Reinhard Breuer
Chefredakteur

Wie viel Zukunft geben wir der Teilchenphysik?

Hochenergiephysiker haben es nicht leicht. Seit Jahrzehnten versprechen sie dem staunenden Publikum die Erklärung dafür, was die Welt im Innersten zusammenhält. Doch ihre Experimentiergeräte sind längst in Größenordnungen gewachsen, die sich technisch wie finanziell kaum mehr realisieren lassen – weshalb sie den Erkenntnisgewinn des jeweils nächsten Schrittes eher euphorisch schildern müssen. Kein Wunder also, dass 1993 der *Superconducting Supercollider* (SSC) in Texas zum Entsetzen der amerikanischen Teilchenphysiker beerdigt wurde, obwohl man schon 22 Kilometer Tunnel und zwei Milliarden Dollar in den Sand vergraben hatte.

Letztendlich hat das Ende des SSC aber dem europäischen Projekt des *Large Hadron Collider* (LHC) am Cern bei Genf Auftrieb gegeben. Obwohl der Ringbeschleuniger ebenfalls schon in Finanzprobleme geschlittert ist, sollen in ihm, als nunmehr einzigem Gerät dieser Größe, ab 2007 Protonen und Atomkerne mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aufeinander prallen. Doch längst trommeln die Forscher schon für ein weiteres Zukunftsprojekt, den *TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator*, kurz Tesla. Der Linearbeschleuniger soll zu noch höherer Energie als der LHC vorstoßen und, wenn es nach dem Willen der deutschen Forscher geht, mit seinem 33 Kilometer langen Tunnel bei Desy vor den Toren Hamburgs errichtet werden (siehe das Interview Seite 83).

LHC, so heißt es in einer Denkschrift, wird eine »Entdeckungsmaschine«; Tesla dagegen soll zeitlich versetzt ab 2012 als »Präzisionsmaschine« fungieren. Dieser Tage wird die Bundesregierung über Tesla befinden. Auch wenn sie wie erwartet der Empfehlung des Wissenschaftsrates folgt, wird sie die Finanzierung der geplanten 3,5 Milliarden Euro von einer kräftigen internationalen Beteiligung abhängig machen. Fachliche Gründe für ein positives Votum hätte sie genug. Denn auch wenn es hochtrabend klingt: Das, was LHC und Tesla gemeinsam an Einsichten ins Weltgefüge erbringen sollen, könnte tatsächlich den Gral der Naturerkenntnis bedeuten. Ende November präsentierten deutsche Teilchenphysiker ihre Visionen in Bonn in einer so überzeugenden Weise, wie man es von der sonst eher unbeholfenen Öffentlichkeitsarbeit dieses Forschungszweiges nicht gewohnt war. Demnach wollen die Physiker nicht nur endlich das Rätsel lösen, warum Materie überhaupt Masse hat. Die Suche nach dem kosmologischen Wesen »dunkler Energie« und »Dunkler Materie« soll ebenso vorangetrieben werden wie das Verschmelzen der Naturkräfte bei höchsten Energien (Seite 24).

»Spätestens 2030, wenn Tesla ausläuft, wird die Teilchenforschung andere Wege beschreiten müssen«

Zwei Dinge wurden mir auf der Tagung in Bonn klar. Erstens: LHC und Tesla bilden ein perfektes Gespann für die Aufklärung fundamentaler Fragen der Naturwissenschaft. Zweitens: Die Teilchenphysik wird danach anders aussehen: Spätestens 2030, wenn Tesla auslaufen soll, wird die Forschung andere Wege zur Teilchenbeschleunigung beschreiten müssen. Sonst steht dieser vornehmsten aller Erkenntniszünfte das Schicksal des SSC bevor.

PS: Exklusiv für unsere Abonnenten veröffentlichen wir ab sofort jeden Monat im Internet einen Artikel, der nicht im Monatsheft erscheint. Den Beginn machen wir mit »Der rätselhafte Fluss der Zeit«. Den Zugang erhalten Sie über www.spektrum-plus.de und Ihre Kundennummer.

Meilensteine der Wissenschaft

Peter Tallack (Hrsg.)
■ **Meilensteine der Wissenschaft**
In 250 Porträts entscheidender Ideen, Entdeckungen oder Erfindungen und ihrer Protagonisten veranschaulicht dieses Buch die Entwicklung der Wissenschaft von 35.000 vor Christus bis zum Jahr 2000. Das attraktive Bilderbuch und informative Nachschlagewerk in einem hat eine starke Sogkraft – wer einmal darin zu blättern anfängt, wird so bald nicht wieder aufhören wollen…
2002, 528 S., 350 Abb., geb.
€ 49,95, *ISBN 3-8274-1380-X*

Jetzt wieder lieferbar !

Morrison/Eames
■ **Zehn Hoch**
Zehn Hoch ist als Bild-Atlas gedacht, mit dem man das bislang erforschte Universum für sich selbst entdecken kann – in zweiundvierzig Dimensionen zwischen Quarks und Galaxien. Die Milchstraße, Sterne, Kometen der Erde, Seen, Brücken, eine Hand, Eiweißmoleküle, Atome und Teilchen darin – das sind nur einige Stationen dieser faszinierenden Reise.
Der Klassiker jetzt als preisgünstige Sonderausgabe!
2003, 168 S., 300 Abb., br.
€ 14,95, *ISBN 3-8274-1426-1*

! Bestellen können Sie mit der Bestellkarte vorne im Heft.
Oder: per Tel. 07071-935369, per Fax: 07071/935393
oder per Mail: shop@spektrum-verlag.de

Spektrum Akademischer Verlag

www.spektrum-verlag.de

INHALT

FORSCHUNG AKTUELL

8 **Der Norden ergrünt im Computer**
Erderwärmung steigert Pflanzenwuchs in Tundra und Taiga – laut Computermodell

10 **Mäuse sind auch nur Menschen**
Die Entzifferung des Mäuse-Erbguts hilft menschliche Krankheiten aufklären

14 **Kommentar: Die Klonbabys der Raelianer**
Unfrohe Weihnachtsbotschaft

15 **In Treue fest durch Dick und Dünn**
Selbst beim Passieren einer Metallfolie bleiben verschränkte Photonen ein Paar

16 **Wohlgenährte Sterne auch bei schwerer Kost**
Schwere Elemente können die Bildung massereicher Sterne nicht verhindern

21 **Kratzen auf atomarer Skala**
Tunnelmikroskop enthüllt atomare Vorgänge bei Reibung und Verschleiß

23 **Bild des Monats**
Künstliche Mini-Igel

SPEKTROGRAMM

54 Schwarze Löcher im Doppelpack · Flexible Flatterei · Schadstoffüberwachung aus dem All · Wanst der Erde wächst u.a.

THEMEN

24 **25 Jahre Spektrum der Wissenschaft. Teil II: String-Physik**
Lösen Fäden und Membranen die tiefsten Naturrätsel?

30 **TITELTHEMA: Kein Kollaps in der Westantarktis**
Die Eisdecke am Südpol ist stabiler als befürchtet

38 **Frei treibende Planeten**
Unsere Vorstellung von dem, was ein Planet ist, muss neu überdacht werden

46 **Zuckerwerk**
Pharmaforschung jenseits von Genen und Proteinen

56 **Korallenriffe im tiefen Nordatlantik**
Unvermutete Laichgründe entdeckt

64 **Neue Insektenordnung**
Gladiatoren bei den Gliederfüßern

72 **Die Romanisierung Galliens**
Warum verschwand die keltische Kultur im Dunkel der Vergangenheit?

Titelbild: Die vermehrte Bildung großer Eisberge schürt Ängste vor einem plötzlichen Anstieg des Meeresspiegels durch den Kollaps der antarktischen Eisdecke.

Bild: Imagebank

TITELTHEMA: GLOBALE ERWÄRMUNG

SEITE 30

Auf dünnem Eis?

Der künftige Anstieg des Meeresspiegels hängt vor allem davon ab, wie schnell die gewaltige Eisdecke der Antarktis schrumpft – eine heiß umstrittene Frage, in der sich endlich ein Konsens abzeichnet.

SEITE 24

SERIE »25 JAHRE SPEKTRUM« (II)

Strings – Urbausteine der Natur?

Mit der Stringtheorie haben die Physiker offenbar eine mathematische Struktur entdeckt, die alle physikalischen Gesetze vereinigt. In neuen Teilchenbeschleunigern könnte die Theorie ihre ersten Tests bestehen.

SEITE 38

ASTRONOMIE

Planeten als Einzelgänger

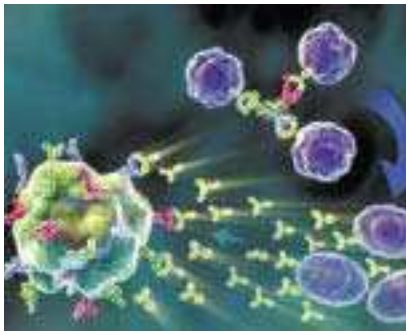
Nicht alle Planeten kreisen um einen zentralen Stern. Manche schwirren fern von ihren Sonnen frei durch den Raum. Insbesondere in Kugelsternhaufen dürfte es zahlreiche Planeten-Waisen geben. Mit speziellen Computern simulieren Astronomen, wie diese neue Klasse von Himmelskörpern entstanden ist.

SEITE 46

PHARMAFORSCHUNG

Süße Medizin

Lange waren Zucker ein Stiefkind biologischer Forschung, trotz ihrer vielfältigen Funktionen im gesunden wie im kranken Körper. Doch die moderne Zucker-Biotechnologie trägt inzwischen Früchte: Sie ermöglicht die Entwicklung neuer Medikamente.



SEITE 56

MEERESFORSCHUNG

Korallengärten in kalten Tiefen

Die kaum erforschten riesigen Korallenriffe in den tiefen Schelfmeeren und an den Kontinentalrändern sind für die Fischbestände der Meere unersetzlich. Befunde internationaler Studien sollen ihre Zerstörung aufhalten helfen.

SEITE 64

ZOOLOGIE

Gladiatoren: Gespenstische Räuber

Sie sehen aus wie eine Mischung aus Gespenst- und Fangschrecken. Die ersten Exemplare dieser bisher völlig unbekannten Insektengruppe fanden Forscher in Bernstein. Dann fingen sie einige Tiere lebend.

SEITE 72

ARCHÄOLOGIE

Romanisierung

Fremd erscheinen heute die Kelten, denn ihre Kultur verschwand unter der römischen Besetzung Galliens, ohne viele Spuren zu hinterlassen. Doch nicht Gewalt hat die Stämme »romanisiert«, sondern der Wunsch nach einem besseren Leben.

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

82 **Museum zum Anfassen**
Das Arithmeum in Bonn präsentiert mechanische Rechenmaschinen

83 **Tesla und die Perspektiven der Teilchenphysik**
Interview mit dem Desy-Vorstandsvorsitzenden Albrecht Wagner

87 **Kommentar**
Regime-Wechsel im Irak?

REZENSIONEN

88 **Lernen** von Manfred Spitzer
Farbatlas. Geschützte und gefährdete Pflanzen von H. Baumann und T. Müller
Rekorde der Technik von H. Frater (Hg.)
Der Mönch im Garten von R. M. Henig
The Blank Slate von Steven Pinker

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

98 **Wie funktioniert der Gyrotwister?**

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**

6 **Leserbriefe**

7 **Impressum**

70 **Wissenschaft im Alltag**
Electronic Cash

80 **Wissenschaft in Unternehmen**

96 **Wissenschaft im Internet**

102 **Im Rückblick**

104 **Preisrätsel**

106 **Stellenmarkt**
Lehre und Forschung

110 **Vorschau**

SPEKTRUM ONLINE – NUR FÜR ABONNENTEN

Der rätselhafte Fluss der Zeit

Wir erleben, wie die Zeit unaufhaltsam dahinströmt – von der unabänderlichen Vergangenheit über die flüchtige Gegenwart zur unbekannten Zukunft. Doch für Physiker ist das nur eine Illusion.

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE
MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Der Sexualtrick der jungen Orang-Utans

September 2002

In dem überaus interessanten Beitrag über die Gründe und die Bedeutung der Entwicklungsverzögerung heranwachsender männlicher Orang-Utans wurde die mögliche Rolle von Pheromonen leider gänzlich außer Acht gelassen. Werden diese chemischen Botenstoffe von einem Organismus freigesetzt, können sie in einem anderen Organismus derselben Art sowohl Verhaltensänderungen verursachen *(releaser pheromone)* als auch Einfluss auf dessen körperliche Entwicklung und Stoffwechsel nehmen *(primer pheromone)*.

Bei dem im Artikel genannten »strengen Moschusgeruch, den sie [die Revierinhaber] in ihrem Territorium verteilen«, könnte es sich durchaus um ein solches *primer pheromone* handeln, das zwar keine direkte Wirkung auf den Hormonhaushalt hat, aber dennoch Einfluss auf die körperliche Entwicklung ausübt. Dafür sprechen auch die Beobachtungen, dass jugendliche Orang-Utans erst dann die sekundären Geschlechtsmerkmale voll ausprägen, nachdem ein erwachsenes, dominantes Männchen aus dem Gehege genommen wurde.

Den Entwicklungsstopp heranwachsender Orang-Utans alleine mit dem Ursachenkomplex Stress, Ernährung und Fortpflanzungserfolg zu begründen, scheint möglicherweise zu kurz gegriffen.

Dr. Uwe Veit, Stuttgart

Männchen, die in einem jugendlich-unauffälligen Stadium verharren, bleiben so groß wie Weibchen.

W. PERRY / CORBIS

Geisteswissenschaften auf der Verliererstraße?

Editorial, November 2002

Geistfeindliche Tendenz

Chefredakteur Breuer stellt hier fest, dass sich die Geisteswissenschaften im Vergleich mit den Naturwissenschaften auf der Verliererstraße sähen. So gerieten die Diskussionen um Stellen- und Drittmittelmangel – etwa auf dem diesjährigen Hallenser Historikertag – sowie die von den Medien ausgemachte geistfeindliche Tendenz zum generellen Thema in den Geisteswissenschaften.

Auch die Änderung des Hochschul-Rahmen-Gesetzes (HRG) trägt ihr Übriges dazu bei, dem akademischen Mittelbau einen vernünftigen, konkurrenzfähigen Zugang zu den Wissenschaften zu verwehren, und die hieraus hervorgehende Zwölfjahresregelung treibt bereits jetzt qualifizierteste Nachwuchswissenschaftler aus dem Land. Gemäß dieser allgemeinen Tendenz nahm m. E. Ihre Zeitschrift in der Vergangenheit international relevante und auch unter interdisziplinären Gesichtspunkten höchst interessante geisteswissenschaftliche Forschung kaum zur Kenntnis, abgesehen von der Beschäftigung mit den Neurowissenschaften beziehungsweise der allgemeinen Wissenschaftsgeschichte.

Ich wünsche, dass »Spektrum der Wissenschaft« nicht zu »Spektrum der Naturwissenschaft« mutiert. Dies würde eine immense Lücke in die wissenschaftsjournalistische Landschaft in Deutschland reißen und den allgemeinen Neglect gegenüber geisteswissenschaftlichen Forschungsprodukten weiter zementieren. Mein Credo wäre stattdessen mehr thematische Diversität und mehr echte Neugierde an den Gegenständen, die die Geisteswissenschaften tatsächlich untersuchen.

Dr. Frank Stahnisch, Erlangen

Eine allein historisch bedingte Chimäre

Der hier und anderswo betonte – zum Teil beschworene, dann aber wieder bedauerte – Antagonismus zwischen Natur- und Geisteswissenschaften ist bei näherer Betrachtung eine wohl allein historisch bedingte Chimäre: Jede Geisteswissenschaft hat nicht nur Berührungspunkte mit Naturwissenschaften, sondern weite Gebiete, die sich mit Naturwissenschaften überschneiden. Gerade die Grenzgebiete zwischen beiden Bereichen werden leider in Ihrer Zeitschrift viel zu selten behandelt. So dürfte es doch seit längerer Zeit sehr dringend notwendig geworden sein, erkenntnistheoretische Grundlagen zu behandeln, die ja merkwürdigerweise jeder Wissenschaftler (aus beiden »Lagern«!) als selbstverständliche Basis seines Denkens und seiner Forschung nimmt und benutzt, ohne sich der Problematik eines solch ungeschützten Gebrauchs bewusst zu werden.

Walter Weiss, Kassel

Die Fabrik auf dem Chip

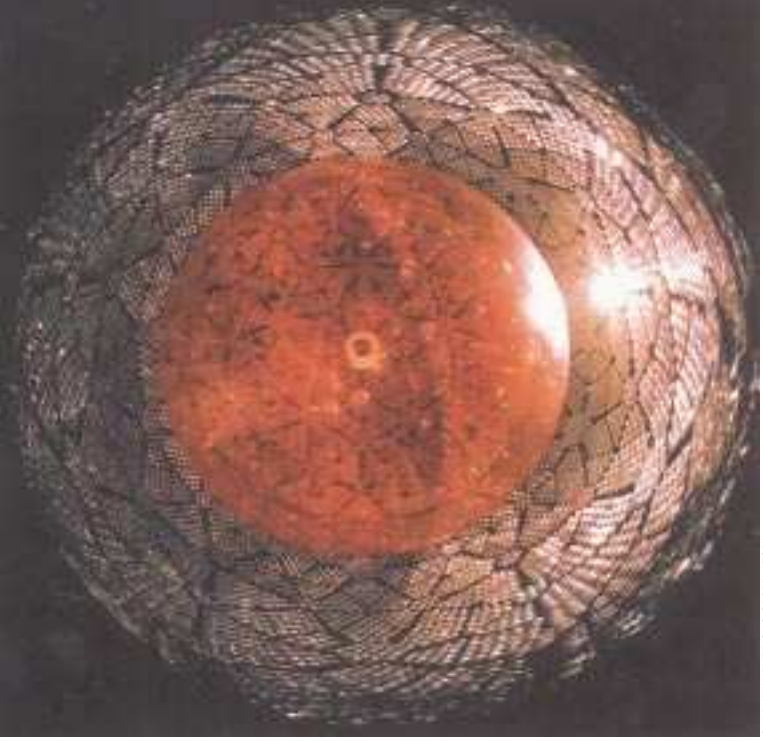
Technoskop, Oktober 2002

In dem genannten Artikel wird behauptet, man könne mit einem kontinuierlichen Mikroreaktor von drei Zentimetern Kantenlänge im Jahr 60 000 Tonnen produzieren. Wie man zwei Liter pro Sekunde durch eine solche Anlage mit Leitungen und Reaktionsgefäßen im Mikrometerbereich pumpen und dort in Mikrosekunden zur Reaktion bringen will, ist mir unvorstellbar.

Dr. F.-F. Wiese, Ludwigshafen

Antwort:

Dass 7000 Liter pro Stunde durch einen Würfel mit nur drei Zentimeter Kantenlänge passen sollen, klingt zugegebenermaßen erstaunlich – aber es ist so. Der Autor hat schon sorgfältig recherchiert – und Sie können alle Einzelheiten auch in einem Artikel im Internet nachlesen, der vom Forschungszentrum Karlsruhe erstellt wurde:
http://hikwww9.fzk.de aktuelles/nachrichten/pdf/ 2002_204.PDF
In einem Punkt haben Sie Recht: Es dürfte schwierig sein, mit 7000 Litern pro Stunde auch noch chemische Umsetzungen durchzuführen – das ist eventuell etwas missverständ-



SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY

Der Detektor des kanadischen Sudbury Neutrino-Observatoriums spürt die solaren Neutrinos über ihre Wechselwirkung mit Deuterium auf.

lich dargestellt. Uns ging es nur darum zu zeigen, dass der Durchsatz durch einen so kleinen Würfel extrem hoch sein kann. Hier dient der Würfel nicht als chemischer Reaktor, sondern als Wärmetauscher. Der 3-cm-Würfel von Karlsruhe enthält 15 000 Mikrokanäle und kann 200 kW umsetzen!

Redaktion

Ende einer unendlichen Geschichte

Forschung aktuell, Oktober 2002

Die Unterscheidung der verschiedenen Neutrino-Arten ist keineswegs so einfach, wie der Artikel suggeriert. Die Wellenlänge des Photons, das bei der gemeinsamen Nachweisreaktion aller drei Neutrino-Arten (Aufbruch des Deuterons in Proton und Neutron; nachfolgender Einfang des Neutrons an einem weiteren Deuteron) freigesetzt wird, beträgt nämlich 198 Femtometer und nicht, wie in dem Beitrag fälschlich behauptet, 198 Nanometer. Statt im UV- liegt sie also im Gamma-Bereich. Der Nachweis dieses Photons erfolgt deshalb nur indirekt über die Tscherenkow-Strahlung, die bei seiner Absorption im schweren Wasser entsteht. Dieselbe Strahlung entsteht aber auch bei der Nachweisreaktion, die allein auf das Elektron-Neutrino anspricht (Aufbruch des Deuterons in zwei Protonen und ein Elektron). Es bedarf daher einer aufwendigen Analyse der Daten, um die Anteile der verschiedenen Nachweisreaktionen und des Untergrundes zu unterscheiden.

Dr. Peter Mohr, Ober-Ramstadt

Inspektionen: die Schlüsselfrage

Forschung und Gesellschaft, November 2002

Das Nichts kann man nicht beweisen. Frau Kraatz-Wadsack erklärt: »Der Irak muss beweisen, dass er nichts hat – nicht wir müssen beweisen, dass er etwas hat.«

Wenn das die Philosophie der UN-Inspektionen ist, dann hat Saddam nicht nur schlechte Chancen, sondern er ist schon verloren. Denn die Nichtexistenz von etwas (Empirischem) kann man nicht beweisen. Niemand kann beweisen, dass es keine Geister gibt. Beweisen kann man nur die Existenz von etwas durch Aufweis: Ich muss es auf den Tisch legen. Wem also der Nachweis der Nichtexistenz abverlangt wird, hat keine Chancen. Der Fordernde kann ja den Beweis von immer neuem Nichts verlangen. »Nichtse« gibt es viel. Offenbar geschieht das jetzt auch, indem von »Lücken« im Bericht der irakischen Regierung gesprochen wird. Eine Lücke ist ein Nichts an Text und dass es eine solche Lücke nicht gibt, kann man nicht beweisen.

Eine vernünftige und auch weltweit gültige Verteilung der Beweislast verlangt nicht von mir den Beweis, dass ich kein Mörder bin, sondern verlangt vom Staatsanwalt zu zeigen, dass ich ein Mörder bin.

Prof. Gerhard Knauss, Blieskastel

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (06221) 91 26 -729

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer, Andreas Merkert (stv. Hersteller)
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-711, Fax (06221) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (02244) 43 03, Fax (02244) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (0211) 908 33 57, Fax (0211) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (06221) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (06221) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Ulf Borgeest, Daniel Fischer, Dr. Olaf Fritsche, Dr. Ingrid Horn, Dr. Susanne Lipps.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-600, Fax (06221) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Tel. (06221) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (06201) 60 61 50, Fax (06201) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (0211) 887-23 79, Fax (0211) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-23 86, Fax (0211) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (030) 7 74 45 16, Fax (030) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (030) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (040) 30 18 31 94, Fax (040) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 301 35-20 50, Fax (0211) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16–18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (069) 92 01 92 82, Fax (069) 92 01 92 88; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (07 11) 22 47 5 40, Fax (07 11) 22 47 5 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (089) 54 59 07-12, Fax (089) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-23 87, Fax (0211) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 24 ab 01.01.2003.

Gesamtherstellung:
Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, D-69038 Heidelberg.
Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder in eine von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Form oder Sprache übertragen oder übersetzt werden. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von VDI-Nachrichten, Düsseldorf; Gruner&Jahr, Hamburg; Weltbild Verlag, Augsburg; VNR-Verlag, Bonn und Spektrum Verlag, Heidelberg. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

KLIMAFORSCHUNG

Der Norden ergrünt im Computer

Jetzt konnten Klimaforscher mit einem Computermodell bestätigen, was Satellitenbeobachtungen bereits nahe gelegt hatten: Infolge der globalen Erwärmung nimmt der Pflanzenwuchs in den hohen nördlichen Breiten zu.

Von Wolfgang Lucht

Die riesigen Wald- und Tundragebiete im Norden unseres Planeten dürften besonders empfindlich auf Klimaänderungen reagieren. In dieser borealen Zone, deren Jahresmitteltemperatur knapp über dem Gefrierpunkt liegt, begrenzt vor allem der lange Winter das Pflanzenwachstum. Schon durch eine geringfügige Erwärmung der Erde sollte sich die Frostperiode verkürzen und die Vegetationsphase deutlich verlängern. Die Folgen wären weitreichend. Vor allem stiege die Produktion von Biomasse. Dadurch würde mehr Kohlendioxid gebunden, und die Zunahme dieses Treibhausgases in der Atmosphäre, die letztlich die globale Erwärmung verursacht, könnte sich etwas verlangsamen. Da die Weiten Sibiriens, Nordeuropas und Kanadas immerhin fast ein Viertel der bewachsenen Landoberfläche der Erde bedecken, hätte dies möglicherweise Auswirkungen auf den Ablauf des globalen Klimawandels.

Deshalb erregte es großes Aufsehen, als US-amerikanische Wissenschaftler im Jahre 1997 bei der Auswertung der längsten vorhandenen Beobachtungsreihen von Satelliten zu dem Schluss kamen, dass die Vegetationsdichte in der borealen Zone seit 1981 tatsächlich zugenommen habe. Der Befund stieß allerdings auch auf Skepsis. Kritiker bemängelten vor allem, dass die Messdaten von verschiedenen, einander ablösenden Satelliten stammten. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Empfindlichkeit der Messgeräte im All im Laufe der Zeit mit jeweils nur ungenau bekannter Rate verringert. Außerdem verändert sich durch die allmähliche Drift der Satellitenbahnen der Sonnenwinkel der Beobachtungen und damit die vom Blattwerk reflektierte Lichtmenge. War den Trends in den Daten also überhaupt zu trauen?

Jetzt hat eine internationale Gruppe von Wissenschaftlern unter unserer Führung am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) diese Frage mit Hilfe eines Computermodells untersucht. Dabei konnten wir nicht nur die Schlussfolgerung aus den Satellitendaten bestätigen, sondern auch tiefere Einblicke in die Hintergründe und Folgen des gesteigerten Pfanzenwachstums im hohen Norden gewinnen.

Mehrere Gruppen beteiligten sich an dem Projekt, das größtenteils vom Deutschen Klimaforschungsprogramm Deklim des Bundesforschungsministeriums finanziert wurde. Das US-Team um Ranga Myneni von der Universität Boston, das die ursprünglichen Satellitenbeobachtungen veröffentlicht hatte, lieferte überarbeitete Daten. Eine französische Arbeitsgruppe trug Messungen der atmosphärischen Konzentration von Kohlendioxid bei, die Rückschlüsse auf die Aktivität der Biosphäre erlaubten. Entscheidend aber war das von drei Teams in Lund, Potsdam und Jena gemeinschaftlich entworfene Dynamische Globale Vegetationsmodell (LPJ-DGVM). Colin Prentice vom Jenaer Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Wolfgang Cramer und Stephen Sitch vom PIK sowie Martin Sykes und Benjamin Smith von der Universität Lund (Schweden) hatten Ende der 1990er Jahre die ersten Versionen dieses Software-Pakets geschaffen.

Simulierte Blattdichte

Das Modell kombiniert vegetationsphysiologische, biochemische, ökologische und biogeografische Informationen, um Stoffkreisläufe in der Biosphäre rechnerisch nachzuvollziehen. Dabei simuliert es nicht nur die räumliche Verteilung wesentlicher Vegetationstypen, sondern auch deren wichtigste Eigenschaften wie Photosyntheserate, Biomasse-Entwicklung im jahreszeitlichen Zyklus, Wasserverdunstung, Verhalten bei Feuereinwirkung und die Konkurrenz mit anderen Pflanzenarten. Im Mittelpunkt steht der Kreislauf des Kohlenstoffs als wichtigstem Bestandteil der Vegetation.

Die neueste Version dieses Modells zogen wir heran, um das Verhalten der Biosphäre in den nördlichen Breiten der Erde in den letzten zwanzig Jahren mit einer räumlichen Auflösung von fünfzig Kilometern zu simulieren. In die Rechnungen gingen ausschließlich monatliche Messwerte für Temperatur, Niederschlag und Bewölkung ein.

Für jeden Ort ermittelt das Programm aus der simulierten Photosynthese, wie viel Kohlenstoff die Pflanzen aus der Atmosphäre aufnehmen und für ihr Wachstum einsetzen. In einem weiteren Schritt modelliert es die Prozesse, die bei der Zersetzung abgestorbener Pflanzenteile – etwa des im Herbst fallenden Laubs – im Boden stattfinden, und berechnet, welche Mengen an Kohlendioxid dabei freigesetzt werden und in die Atmosphäre entweichen. Damit schließt sich der Kreislauf des Kohlenstoffs in der Biosphäre.

Die Resultate unserer Simulation waren überzeugend: Die Schwankungen der Vegetationsdichte, die das Programm aus

NASA / ESE / GSFC / GES / MODIS

Neufundland in Kanada gehört zu der nördlichen Waldzone, deren Vegetation besonders schnell auf Klimaänderungen reagiert. Diese Aufnahme des Sensors Modis *(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)* auf dem Nasa-Satelliten Terra stammt vom 19. Juni vergangenen Jahres. Instrumente wie Modis erlauben eine verbesserte großflächige Überwachung der Vegetation.

den wechselnden Witterungsbedingungen in den verschiedenen Jahren berechnete, stimmten sehr gut mit den Messdaten aus dem Weltraum überein. Lag in einem Jahr der maximale Pflanzenwuchs im kurzen nördlichen Sommer über dem Durchschnitt, so zeigte auch das Modell diese Abweichung. Sogar bei monatlicher Auflösung reproduzierte es den beobachteten Verlauf der Vegetationsdichte. Wenn etwa in einem Jahr der Frühling verspätet eintrat, passierte das auch in der Simulation.

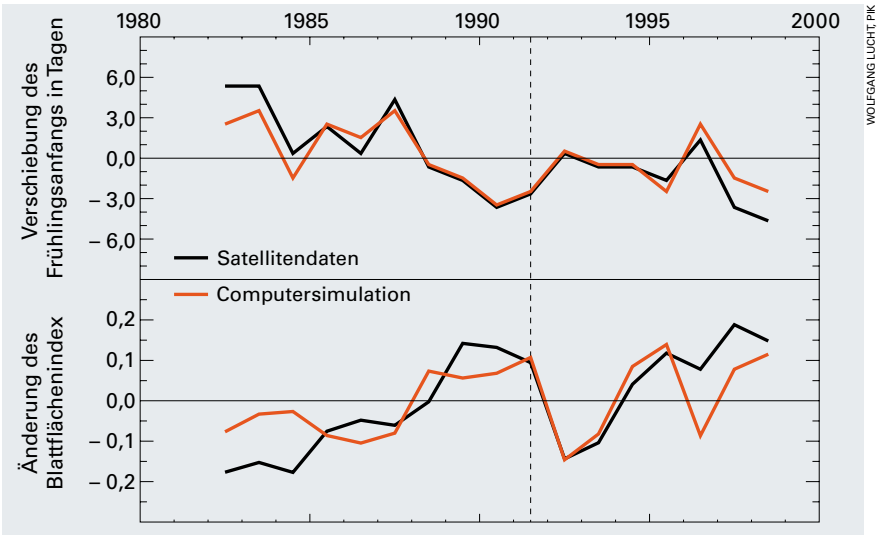
Unser Hauptinteresse aber galt dem langfristigen Trend. Tatsächlich zeigt das Modell zwischen 1981 und 1998 in Einklang mit den Satellitendaten eine Zunahme der Vegetationsdichte in der borealen Zone um mehrere Prozent. Zugleich beweist es, dass dieses Ergrünen von dem Temperaturanstieg um 0,8 Grad Celsius im hohen Norden während der letzten zwanzig Jahre herrührt. Hielten wir im Modell nämlich die Temperatur konstant, blieb die berechnete Vegetationsdichte weitgehend unverändert.

Außerdem ergaben unsere Simulationen in Übereinstimmung mit den Satellitenbeobachtungen einen stetig früheren Beginn der Frühlings. Ende der 1990er Jahre setzte der Pflanzenwuchs im Norden um mehrere Tage eher ein als noch zwei Dekaden zuvor. Da eine analoge Verschiebung auch im Herbst stattfand, verlängerte sich die Vegetationsperiode insgesamt um mehr als eine Woche – eine bedeutende Veränderung bei einer mittleren Wachstumsperiode von nur 3,5 Monaten.

Vulkanausbruch als Nagelprobe

Für einen spannenden zusätzlichen Test unseres Modells sorgte übrigens die Natur selbst: Mitten in unsere Messreihen fiel der Ausbruch des Pinatubo im Juni 1991. Dabei schleuderte der philippinische Vulkan große Mengen an Schwefelgasen in die Stratosphäre. Sie verteilten sich in den folgenden Monaten weltweit und bildeten einen Aerosolschleier, der die Sonnenstrahlung abschwächte. Dies führte zu einer globalen Abkühlung um ein halbes Grad. Parallel dazu zeigten die Satellitendaten eine Unterbrechung des Trends zu stärkerem Pflanzenwachstum: Die boreale Biosphäre erlitt 1992 und 1993 einen deutlichen Rückschlag. Allerdings blieb unklar, inwieweit die Aerosolpartikel in der Atmosphäre auch die Satellitenmessungen verfälscht hatten. Unsere Simulation bestätigte jedoch, dass die beobachteten Rückgänge in der Vegetationsdichte real waren.

Der Vulkanausbruch warf aber auch ein Rätsel auf. Die Biosphäre nimmt seit einigen Jahrzehnten mehr Kohlenstoff auf, als sie an die Atmosphäre abgibt. Wie Messungen der atmosphärischen Konzentration von Kohlendioxid zeigten, verstärkte sich dieses Phänomen nach der Eruption. Das widersprach allen Erwartungen; denn wegen der verringerten Sonnenstrahlung ▷



WOLFGANG LUCHT, PIK

Die Simulationen mit dem Vegetationsmodell LPJ-DGVM stimmen mit den Beobachtungen von Satelliten überein. Seit Beginn der 1980er Jahre tritt in der nördlichen Wald- und Tundrazone der Erde das Frühjahr um mehrere Tage früher ein, und die Pflanzendichte nimmt zu. Der Blattflächenindex gibt an, wie viele Blattschichten sich im Mittel über jedem Quadratmeter befinden. Der Trend zu einem immer grüneren Norden wurde nach dem Ausbruch des Vulkans Pinatubo 1991 unterbrochen, setzte sich dann aber fort.

▷ und der niedrigeren Temperaturen wuchsen die Pflanzen langsamer und nahmen daher weniger Kohlenstoff auf als zuvor.

Das Computermodell lieferte die verblüffende Erklärung dieser Paradoxie. Die Abkühlung durch den Ausbruch ließ nicht nur die Biomasseproduktion zurückgehen, sondern auch die mikrobielle Zersetzung von organischem Material im Boden und damit die Rückgabe von Kohlendioxid an die Atmosphäre. Da die Zersetzung stärker abnahm als das Pflanzenwachstum, ergab sich für den Zeitraum nach dem Ausbruch insgesamt eine erhöhte Nettospeicherung von Kohlenstoff in der Biosphäre.

Derzeit wirkt die Biosphäre dem Treibhauseffekt entgegen; denn sie nimmt wegen des gesteigerten Pflanzenwachstums mehr Kohlendioxid auf, als sie abgibt. In etwa fünfzig Jahren allerdings, so sagt unser Modell unter der Annahme eines immer wärmeren Klimas und weiter ansteigender Emissionen von Kohlendioxid voraus, wird das Mehrwachstum durch eine Steigerung der mikrobiellen Zersetzung im Boden ausgeglichen. Dann ist das Potenzial des ergrünenden Nordens als Bremse des Treibhauseffekts ausgeschöpft.

Die Bedeutung der jetzt von uns erzielten Ergebnisse geht somit weit über die boreale Waldzone hinaus. Sie beweisen nicht nur, dass die Biosphäre begonnen hat, auf die globale Erwärmung zu reagieren, sondern machen auch deutlich, dass unsere heutigen Modelle in der Lage sind, dynamische Vorgänge im Pflanzenreich realistisch abzubilden. Damit haben wir ein leistungsstarkes Werkzeug in der Hand, um probeweise in die Zukunft zu schauen und mögliche Szenarien einer kommenden Treibhauswelt vorab zu erkunden. ◁

Wolfgang Lucht ist promovierter Physiker und erforscht am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung die Dynamik der Biosphäre.

GENETIK

Mäuse sind auch nur Menschen

Genetiker haben nun auch das Erbgut der Maus komplett entziffert. Wie sich zeigte, ist es dem Genom des Menschen erstaunlich ähnlich. Damit eröffnet es die große Chance, genetisch bedingte menschliche Krankheiten genauer zu ergründen.

Von Olaf Schmidt

Um den Menschen zu verstehen, reicht der Mensch nicht aus. Die Wissenschaftler des Human-Genom-Projektes erkannten dieses Paradox schon vor Jahren: Um den Text unserer Erbinformation nicht nur buchstabieren zu lernen, sondern auch seinen Inhalt zu erfassen, machten sie sich früh daran, für Vergleichszwecke zusätzlich die einfacheren Genome anderer Tiere zu entziffern. Dabei sind sie jetzt einen bedeutenden Schritt vorangekommen. Mehrere hundert Forscher konnten die komplette DNA-Sequenz der Maus vorlegen – und umgehend interessante Schlussfolgerungen für den Menschen ziehen. Zum Beispiel gelang es, jene Gene zu identifizieren, die wahrscheinlich beim Down-Syndrom eine Rolle spielen.

Die neuen Ergebnisse sind so wichtig, weil die Maus das bedeutendste Tiermodell für alle denkbaren biologisch-medizinischen Untersuchungen darstellt. Seit hundert Jahren beschäftigen sich Wissenschaftler mit dem Nager. In dieser Zeit gab es ▷

Nun auch genetisch ein offenes Buch: die Maus. Sie ist schon lange ein beliebtes Labortier zur Erforschung menschlicher Krankheiten.

DPA

praktisch kein Gebiet der Biologie oder Medizin, auf dem er sich nicht unentbehrlich gemacht hat. Gleich ob Genetik, Pharmakologie oder Psychologie – Studien an der Maus und die Resultate daraus lieferten stets wichtige Erkenntnisse. Nun hat die Laborkarriere des putzigen Tierchens wohl einen neuen Höhepunkt erreicht. Denn der Vergleich zwischen dem Erbgut von *Mus musculus* und *Homo sapiens* ermöglicht weitreichende Einblicke in die Biologie des Menschen. Während Wissenschaftler früher zehn bis fünfzehn Jahre benötigten, um zehn mögliche krankheitsrelevante Gene ausfindig zu machen, haben sie dank der Maus-Sequenz nach wenigen Monaten schon weit über hundert neue solche Erbfaktoren in den Händen.

Der Mensch im Spiegel der Maus

Hinter der vergleichenden Genomik steht ein simpler Gedanke: Je mehr Erbgut-Sequenzen man einander gegenüberstellt, umso deutlicher tauchen aus dem endlosen Buchstaben-Wirrwarr sinnvolle Passagen auf. Wenn die Biologen einen bestimmten Abschnitt in ganz ähnlicher Form sowohl im Erbgut der Maus als auch in dem des Menschen finden, muss er wichtig sein und stellt daher wohl ein Gen dar. Sonst hätte die Natur dieses Teilstück während der Evolution nicht vor drastischen Veränderungen oder dem kompletten Verlust bewahrt.

Einer von über tausend Erbfaktoren, die durch den Vergleich zwischen Mensch- und Maus-Genom entdeckt wurden, ist APOA V. Wie sich zeigte, gehört er zu einer schon länger bekannten Gen-Familie. Die Abkürzung APO steht für Apolipoprotein, einen Eiweißstoff, der Bedeutung im Fettstoffwechsel und bei Herz-Kreislauf-Erkrankungen hat. Der Neuzugang ist umso überraschender, als man die APO-Familie seit langem für vollständig hielt. Funktionsstudien mit dem Protein zeigten, dass es bei der Regulation der Konzentration an Triglyceriden im Blut mitwirkt. Diese Neutralfette sind den Medizinern wohl bekannt und allen Sterblichen ein Übel – zumindest bei zu hoher Konzentration: Sie erhöhen das Risiko für Erkrankungen der Herzkranzgefäße.

Das internationale »Mouse Genome Sequencing Consortium« um den Sequenzierungsexperten Eric Lander vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge präsentierte den ersten Entwurf des entzifferten Maus-Genoms nur etwa eineinhalb Jahre, nachdem entsprechende Daten für den Menschen vorgelegt worden sind (*Nature, Bd. 420, S. 520*). Der Begriff Entwurf bedeutet, dass etwa 96 Prozent des Erbgutes erfasst wurden.

Was sich früher schon andeutete, ist nun Gewissheit geworden: Dass wir die Krone der Schöpfung sein sollen, schlägt sich nicht unmittelbar in einem genetischen »Größer-schöner-besser« nieder. Maus und Mensch haben ungefähr die gleiche Anzahl Gene: rund 30 000. Dabei ist das Erbgut der Nager etwa 14 Prozent kleiner als das des Menschen, weil es – so vermuten Lander und seine Mitstreiter – im Verlauf der Stammesgeschichte Abschnitte verloren hat.

Während dieses Ergebnis wohl nur für Evolutionsgenetiker interessant ist, dürfte ein anderer Befund auch Laien verblüffen: Obwohl die Maus im Tierreich keineswegs zu unseren nächsten Verwandten zählt, lässt nur etwa ein Prozent ihrer Gene jede Spur von Ähnlichkeit mit unserem Erbgut vermissen. Der Mensch weicht genetisch also viel weniger von der Maus ab als vermutet. Natürlich sind die 99 Prozent gemeinsamer Erbfaktoren in beiden Arten nicht völlig identisch, sie unterscheiden sich sehr wohl in den Details. Aber grundsätzlich verfügen wir über fast den gleichen Satz an Genen. Forscher glauben sogar, bei uns die Anlage für ein Schwänzchen erkannt zu haben.

Nach der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*, dem Kugelfisch *Fugu rubripes*, der Taufliege *Drosophila melanogaster* und dem Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* ist die Maus der fünfte Modellorganismus, dessen Erbsequenz bestimmt wurde. Auch die anderen vier Organismen lieferten per vergleichender Genomik bereits aufschlussreiche Ergebnisse und halfen bei der Identifizierung neuer Erbfaktoren mit. Doch *Mus musculus* übertrifft sie alle. Denn die Maus hat einen weiteren Vorteil: Sie erlaubt es, auch regulatorische Sequenzen zu ermitteln – also diejenigen Elemente, die darüber entscheiden, wann und wo »ruhende« Gene angeschaltet und abgelesen werden.

Bewahrenswerter Ballast

Mit einem Anteil von etwa zwei bis drei Prozent machen die Erbanlagen selbst nämlich nur einen Bruchteil in unserem Genom aus. Sie verschwinden fast in einem Wust von »nicht-codierenden« Bereichen, die keine Bauanleitung für ein Protein darstellen. Deren Sinn und Zweck ist bisher unklar. Das Credo der Genetiker lautete: Diese Abschnitte bergen keinerlei lebenswichtige Informationen, sodass sie sich während der Evolution ziellos verändern können.

Doch das ist wohl ein Trugschluss. Was lange Zeit mehr oder minder als Schrott galt, enthält anscheinend doch – zumindest teilweise – wichtige Informationen. Beim Vergleich von Maus und Mensch erkannten Lander und seine Kollegen nämlich, dass die Evolution nicht nur die zwei bis drei Prozent Gene bewahrt hat. Vielmehr sind bei immerhin fünf Prozent des Erbguts keine großen Unterschiede feststellbar. Folglich verbergen sich in den nicht-codierenden Abschnitten bisher unentdeckte, aber eben wichtige regulatorische Elemente. Die Maus-Sequenz bietet die Chance, ihnen auf die Spur zu kommen.

Auch zwei Veröffentlichungen anderer Forscherteams unterstreichen, welch hohen Wert das Nager-Genom für vergleichende Analysen hat. Mit seiner Hilfe gelang es, die genetischen Grundlagen des

ULLSTEINBILD

Ein erster Vergleich des Erbguts von Mäusen und Menschen ergab interessante neue Erkenntnisse über die genetischen Hintergründe des Down-Syndroms. Bei dieser Erbkrankheit – hier ein betroffenes Mädchen – ist das Chromosom 21 dreifach vorhanden statt doppelt.

Down-Syndroms genauer zu erforschen. Diese erblich bedingte Störung beruht darauf, dass die betroffenen Menschen in ihren Körperzellen drei anstatt der üblichen zwei Exemplare des Chromosoms 21 haben, weshalb man auch von Trisomie 21 spricht. Ein tieferes Verständnis dieser Krankheit erfordert, für jedes Gen auf dem betreffenden Chromosom herauszufinden, in welchem Gewebe und in welchem Stadium der Körperentwicklung es angeschaltet wird und damit zum Einsatz kommt – Genetiker sprechen von Expression.

Aus nahe liegenden Gründen können die Experimente nicht am Menschen selbst ausgeführt werden. Die mittlerweile bekannte Maus-Sequenz bot da eine willkommene Ausweichmöglichkeit. Die Forscher führten an dem Nager so genannte Expressionsstudien durch. Dabei verfolgten sie die Aktivität von 158 Genen in ausgewählten Stadien der Embryonalentwicklung. Die Methode ist recht raffiniert. Wenn ein Gen angeschaltet wird, bildet die Zelle eine kleinere, gebrauchsfertige Abschrift davon: eine so genannte mRNA. Nach ihr suchen die Biologen mit einer markierten Sonde, die jeweils nur diese eine Abschrift erkennt. Findet die Sonde ihr mRNA-Molekül, bindet sie sich daran und verrät durch ihre Markierung, dass die Abschrift vorhanden, das Gen also angeschaltet ist.

Gen für mongoloide Gesichtszüge

Aus den Ergebnissen von weit über 6000 solchen Experimenten erstellten die Wissenschaftler einen »Expressionsatlas«. Darin ist für die erwähnten 158 Gene verzeichnet, wann und wo sie während der Entwicklung des Organismus in der Gebärmutter in Aktion treten. Eines davon namens *Adamts5* enthält die Bauanleitung für ein Enzym aus der Gruppe der so genannten Disintegrin-Metalloproteasen.

Den diversen Vertretern der *Adam*-Familie schreiben die Biologen verschiedene Funktionen bei der Zell-Zell-Kommunikation zu. Wie sich nun herausstellte, wird *Adamts5* während der Gesichtsentwicklung und vorübergehend im ventralen Mittelhirn angeschaltet. Dieses verräterische Verhalten deutet darauf hin, dass das Gen für die gestörte geistige Entwicklung und die typische »mongoloide« Gesichtsform von Menschen mit Down-Syndrom mitverantwortlich sein könnte. Bei den Missbildungen am Herzen fiel der Verdacht auf insgesamt fünf Gene. Eines davon namens *Sh3bgr* ist etwa zehn Tage nach der Befruchtung im Herzen des Embryos aktiv.

VALERIA MARIGO, TELETHON INSTITUTE OF GENETICS AND MEDICINE, NEAPEL

GREGOR EICHELE, MPI FÜR EXPERIMENTELLE ENDOKRINOLOGIE, HANNOVER

Auf der Suche nach der Ursachen der typischen Störungen beim Down-Sydrom analysierten Wissenschaftler, welches der Gene auf Chromosom 21 bei der Maus während der Embryonalentwicklung wann in welchem Gewebe aktiviert wird. Dabei zeigte sich unter anderem, dass etwa zehn Tage nach der Befruchtung im Herzen, das bei Menschen mit Down-Syndrom oft Fehlbildungen aufweist, vorübergehend ein Erbfaktor namens *Sh3bgr* in Aktion tritt. In den drei Aufnahmen wurde durch Farbmarker die Aktivität des *Sh3bgr*-Gens in verschieden alten ganzen Embryonen und in einem Gewebeschnitt sichtbar gemacht.

Auch echte Überraschungen gab es. Zum Beispiel glaubte man bisher, dass der Erbfaktor *Tsga2* ausschließlich im Hoden eine Rolle spielt. Den Expressionsstudien nach kommt er aber auch in bestimmten Gehirnbereichen zum Einsatz und wirkt bei der Ausbildung des Rautenhirns mit. Insgesamt ergab sich ein raumzeitliches Muster differenzierter Gen-Aktivität, das alle beim Down-Syndrom betroffenen Gewebe umfasst.

Auf den ersten Blick mag der Wert dieser Ergebnisse nicht spektakulär erscheinen. Schließlich untersuchten die Forscher »nur« die Maus. Allerdings wissen sie, welchen menschlichen Genen die 158 beim Nagetier entsprechen. Die Befunde lassen daher Rückschlüsse auf den Menschen zu und legen den Grundstein für verfeinerte Einzeluntersuchungen mit den humanen Sequenzen.

Wie bei derartigen Arbeiten üblich, formulieren die Autoren ihre Artikel sehr vorsichtig. Sie legen sich nicht fest, ob die identifizierten Erbanlagen nun die Alleinschuld an der Entwicklung des Down-Syndroms tragen und welchen Anteil an der Erkrankung sie haben; auch noch völlig unbekannte Faktoren schließen sie nicht aus. Aber in einem Punkt sind sich Lander und seine Kollegen einig: Die Maus-Genom-Daten bilden ein vielseitig einsetzbares Werkzeug für die weitere Forschungsarbeit. Das gilt nicht nur für das Down-Syndrom, sondern auch für viele andere Erkrankungen mit genetischem Hintergrund sowie generell für die Entschlüsselung des menschlichen Erbguts, die mit der Sequenzierung erst angefangen hat. ◁

Olaf Schmidt ist promovierter Molekularbiologe und lebt als Wissenschaftsjournalist in Neuss.

KOMMENTAR

Die Klonbabys der Raelianer

Unfrohe Weihnachtsbotschaft

Von Michael Groß

Wird eine neue Errungenschaft per Pressekonferenz mitgeteilt statt per Fachpublikation, ist immer Skepsis angebracht. Die Zweifel wachsen beträchtlich, wenn ein Labor die Erfolgsmeldung herausbringt, das an keiner der vorangegangenen Stufen der Entwicklung beteiligt war und obendrein die Einzelheiten der Forschung geheim hält.

Nach diesen Kriterien gibt es allen Grund, die Verkündung der von der Raelianer-Sekte gegründeten Firma Clonaid zu bezweifeln, dass am zweiten Weihnachtstag 2002 das erste geklonte Menschenkind per Kaiserschnitt entbunden worden sei. Freilich lässt sich die Behauptung der Clonaid-Chefin Brigitte Boisselier leicht überprüfen. Dazu genügt ein simpler Gentest. Er ist einfacher als ein Vaterschaftstest, da bei einem echten Klonbaby keine Vermischung von Erbgut stattgefunden hat: Die Kern-DNA von Mutter und Tochter stimmt entweder völlig überein oder nicht. Eine Grauzone wird es nicht geben. Allerdings hat die Sekte entgegen der ursprünglichen Ankündigung erst einmal den Test verweigert – auch bei einem weiteren angeblichen Klonbaby in den Niederlanden.

Im Moment tendiere ich zu der Auffassung, dass die Raelianer entweder Recht haben oder zumindest in gutem Glauben irrten. Sie hängen zwar abstrusen Wahnideen an, sind aber sicher nicht so dumm, sich vor der Weltöffentlichkeit unsterblich blamieren zu wollen. Und selbst wenn sich die beiden Klonbabys als Weihnachtsenten entpuppen, bleiben die Aussagen des italienischen Mediziners Severino Antinori, der behauptet, mit geklonten Embryonen mehrere Schwangerschaften etabliert zu haben.

Nehmen wir einmal an, dass zumindest einem der beiden Labors die behauptete Revolution gelungen ist, was folgt daraus für die Wissenschaft und die Wissenschaftsethik? Für die Biologie würde es bedeuten, dass das Klonen von Menschen erheblich einfacher ist als das von Schafen – schließlich brauchte es fast 300 Versuche, bis mit Dolly ein lebensfähiges Klonschaf geboren wurde. Das wäre überraschend, aber nicht undenkbar. Es stünde zudem im Einklang mit einem frappierenden Befund von Forschern an einer Fruchtbarkeitsklinik in São Paulo (Brasilien), die laut Presseberichten den halbierten (haploidisierten) Gensatz einer Körperzelle in eine entkernte menschliche Eizelle einschleusten und diese dann erfolgreich befruchteten. Die erschrockenen Forscher, die nicht damit gerechnet hatten, dass die auf derart unnatürliche Weise manipulierte Eizelle sich normal entwickeln würde, legten den Embryo erst einmal auf Eis, um die Angelegenheit zu überdenken.

Die ethische Debatte über das Klonen zu Fortpflanzungszwecken (von dem etwas anders gelagerten Problem des therapeutischen Klonens soll hier nicht die Rede sein) ähnelt der vor 25 Jahren ausgetragenen Diskussion zur In-vitro-Fertilisation (IVF). Heute wie damals gibt es eine Seite, die ein Recht auf Nachwuchs mit eigenen Genen einfordert, das mit allen zur Verfügung stehenden technischen Mitteln verwirklicht werden soll. Dagegen behaupten die Anhänger oft auf religiöse Überzeugungen gestützter strikter Moralvorstellungen, dass die menschliche Fortpflanzung ein Tabubereich sei, in den die Wissenschaft nicht eingreifen dürfe. In der Mitte stehen Forscher wie Rudolf Jaenisch vom Whitehead-Institut für biomedizinische Forschung in Cambridge (Massachusetts). Die gehen auf Grund der Erfahrungen mit Tierversuchen davon aus, dass die wissenschaftlichen Erkenntnisse noch nicht ausreichen, um reproduktives Klonen auch nur zu versuchen – die Risiken für das Kind seien viel zu groß (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/2003, S. 94). Sollte Clonaid wirklich gesunde Klonbabys erzeugt haben, würde diesen Kritikern natürlich der Wind aus den Segeln genommen.

Ohne für die eine oder andere Seite Partei zu ergreifen, kann man feststellen, dass die schleichende Anpassung der Moralvorstellungen an das technisch Mögliche bisher immer denen Recht gegeben hat, die der Fortpflanzung so gut wie möglich nachhelfen wollen. Inzwischen kommen jedes Jahr tausende IVF-Babys zur Welt, und niemand regt sich mehr darüber auf.

Nun hat das Klonen gegenüber der normalen Reagenzglas-Befruchtung freilich die Besonderheit, dass Kind und Erbgutspender genetisch identisch sind. Das wirft zusätzliche ethische Probleme auf. Sie wurden in den Medien allerdings maßlos übertrieben. Zwei Menschen, die mit denselben Kern-Genen, aber zu verschiedenen Zeiten von verschiedenen Müttern geboren werden, sind beileibe nicht identisch. So unterscheiden sie sich in den – zugegebenermaßen wenigen – mitochondriellen Genen. Vor allem aber beeinflussen die Hormone, denen das Kind im Mutterleib ausgesetzt ist, spätere körperliche Eigenschaften und Persönlichkeitsmerkmale wie die relative Länge von Gliedmaßen oder die sexuelle Präferenz. Insofern werden Klone zwar ihrem einzigen Elternteil ähnlicher sein als normale Kinder oder Geschwister, aber nicht so ähnlich wie eineiige Zwillinge.

Ohnehin könnte sich dieses ethische Dilemma bald verflüchtigen. Sollte die in São Paulo gelungene Haploidisierung tatsächlich einen gangbaren Weg zu gesunden Embryonen eröffnen, dürfte es schon bald keinen Grund mehr geben, identisches Klonen als Fruchtbarkeitsbehandlung einzusetzen. Ich könnte mir vorstellen, dass die Klonbabys in zehn Jahren schon wieder der Vergangenheit angehören. Mittels der Haploidisierung von Körperzellen wäre es möglich, unfruchtbaren oder auch homosexuellen Paaren zu Kindern mit dem gemischten Erbgut beider Eltern zu verhelfen. Damit werden die Raelianer (denen das Klonen als Grundlage ihrer Religion dient) und auch Anhänger der einen oder anderen etablierten Glaubensrichtung gewisse Probleme haben, aber rational denkende Menschen wohl nicht.

Michael Groß ist Biochemiker und als freier Autor mit dem Birkbeck-College in London verbunden.

QUANTENPHYSIK

In Treue fest durch Dick und Dünn

Ein quantenmechanisch verbandeltes Paar von Lichtquanten lässt sich vorübergehend in Elektronenschwingungen umwandeln, ohne dass die intime Beziehung verloren geht. Damit rückt die Möglichkeit näher, einen Quantencomputer zu bauen, der mit derart »verschränkten« Zuständen komplexe Rechenoperationen ausführt.

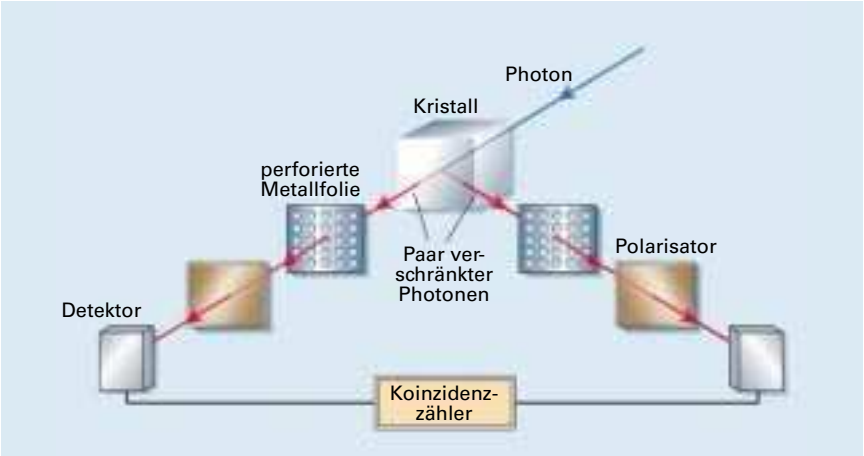
Von Michael Springer

Heute ist es fast schon Routine, Paare von Lichtquanten zu erzeugen, die einen gemeinsamen Quantenzustand bilden und damit das Phänomen der Verschränkung zeigen. Trifft ein kurzwelliger Laserstrahl einen optisch nichtlinearen Kristall, so entstehen zwei schwache Strahlen der doppelten Wellenlänge. Wo die Strahlenkegel einander überlappen, bestehen sie aus Paaren unterschiedlich polarisierter Photonen, deren Schicksal selbst über makroskopische Distanzen hinweg untrennbar verbunden bleibt: Findet man etwa bei der Messung des einen Lichtteilchens eine vertikale Polarisation, so erweist sich die Schwingungsrichtung des Partners stets als rechtwinklig dazu, nämlich horizontal.

Generell können Quantensysteme allerdings auch in einer Mischung oder »Überlagerung« mehrerer Zustände vorliegen. Bevor sie gemessen werden, sind sie dann vieldeutig. Doch der Messvorgang zwingt sie gewissermaßen, sich für einen Zustand – etwa eine bestimmte Polarisationsrichtung – zu entscheiden. Das gilt auch für verschränkte Zustände und hat dort eine geradezu unheimlich wirkende Konsequenz. Nehmen wir an, das Photonenpaar sei »schräg« polarisiert, liege also in einer Überlagerung aus vertikaler und horizontaler Polarisation vor. Wenn sich in diesem Fall nun das eine Lichtquant bei einer Messung für den vertikal polarisierten Zustand »entscheidet«, nimmt im selben Moment das andere den horizontalen an.

Allerdings ist ein verschränktes – oder quantenmechanisch »kohärentes« – Paar in einem überlagerten Zustand extrem anfällig für kleinste Wechselwirkungen mit der Umgebung. Jeder Umwelteinfluss wirkt quasi als Messung. Damit geht aber gerade die Unbestimmtheit verloren, die solche überlagerten Zustände für künftige Quantencomputer attraktiv machen würde. ▷

Ein optisch nichtlinearer Kristall erzeugt verschränkte Photonen, die rechtwinklig zueinander polarisiert sind. Sie bleiben auch verschränkt, wenn sie sich beim Durchqueren dünner Metallfolien vorübergehend in Elektronenschwingungen verwandeln müssen: Der Koinzidenzzähler spricht weiterhin nur dann an, wenn die zwei drehbaren Polarisationsfilter senkrecht zueinander stehen.



NATURE, BD. 418, S. 281

Lexikon der Chemie

Umfassend, zuverlässig und aktuell informiert das 3-bändige *Lexikon der Chemie* über die Grundlagen der Chemie und vermittelt fundierte Hintergrundinformationen über moderne Anwendungen in der Praxis von Industrie und Forschung. Zahlreiche Illustrationen, eine einheitliche Nomenklatur nach IUPAC-Empfehlung und eine ausgereifte Verweissystematik erlauben dem Benutzer die schnelle, präzise und gut verständliche Information.

- drei Alphabetbände mit jeweils ca. 485 S., geb.
- rund 10.000 Stichwörter zu allen Gebieten der Chemie, darunter auch zu hochaktuellen Bereichen wie Umweltchemie, Biochemie und Biotechnologie
- verfasst von 40 namhaften Autoren
- über 400 Abb. und Tab. sowie 1.120 Strukturformeln

www.spektrum-verlag.de

Sparen Sie jetzt bis zu € 197,- !!

■ **Gesamtausgabe Buch**
zum Preis von insgesamt € 99,95.
ISBN 3-8274-0552-1

■ **Gesamtausgabe CD-ROM**
zum Preis von insgesamt € 99,95.
ISBN 3-8274-1152-1

■ **Kombi-Ausgabe: Buch + CD-ROM**
zum Preis von insgesamt € 149,–.
ISBN 3-8274-1151-3

Bestellen können Sie mit der Bestellkarte vorne im Heft.
Oder: per Tel. 07071-935369, per Fax: 07071/935393
oder per Mail: shop@spektrum-verlag.de

Spektrum Akademischer Verlag

▷ Denn Quantenrechner – vorerst noch pure Zukunftsmusik – sollen statt mit üblichen Bits, die nur je einen von zwei möglichen Werten annehmen können, mit so genannten Quantenbits arbeiten. Solche »Qubits« wären komplexe Zustandsüberlagerungen. Sofern es gelänge, sie bis zum Abruf des Resultats in der Schwebe zu halten, könnte das Rechnen mit ihnen die Kapazität jedes klassischen Parallelrechners in den Schatten stellen. Voraussetzung dafür ist freilich, dass die Qubits im Computer manipuliert werden können, ohne unterwegs ihre wertvolle Vieldeutigkeit einzubüßen.

Doppelter Verwandlungstrick

Erstaunlicherweise ist es nun einer Gruppe um Erwin Altewischer an der Universität Leiden (Niederlande) gelungen, verschränkte Photonen in Elektronenschwingungen und wieder zurück zu verwandeln, ohne dass die Kohärenz des gemeinsamen Zustands verloren ging (*Nature, Bd. 418, S. 304*). Solche Umwandlungen sind natürlich höchst erwünscht, wenn man dem Ziel, Computer mit Quantenbits in Betrieb zu nehmen, näher kommen möchte.

Das Leidener Kunststück erfordert freilich nicht unerheblichen Aufwand an nanotechnischer Raffinesse. Als Quantenschwingungswandler dienen spezielle optische Hürden: auf zwei dünne Glasplättchen aufgedampfte Goldschichten von nur 200 Nanometer (millionstel Millimeter) Dicke, die in Abständen von 700 Nanometern winzige Löcher mit je 200 Nanometer Durchmesser enthalten. Durch diese Konfiguration erreichen Altewischer und seine Kollegen, dass die ankommenden Photonen einem leitfähigen Festkörper begegnen, der aus optisch undurchlässigem Material besteht, aber ein periodisches Muster aus Löchern mit Durchmessern und Abständen unterhalb der Laserlichtwellenlänge von rund 800 Nanometern aufweist.

Solche Strukturen verwandeln einfallende Photonen in Ladungsschwingungen, genauer in Dichteschwankungen der Elektronen nahe der Metalloberfläche. Diese sind ebenso wie das Licht, das sie ausgelöst hat, gequantelt und verhalten sich somit als Teilchen, so genannte Plasmonen. Die quantisierten Ladungswellen durchtunneln nun praktisch ungehindert die Folie, da diese dünner als ihre Wellenlänge ist. Sobald sie die rückwärtige Oberfläche erreicht haben, verwandeln sie sich wieder in Photonen, die ihren Weg im Prinzip – abgesehen von einem gewissen Intensitätsverlust – fortsetzen, als wären sie nie einem Hindernis begegnet. Der Clou des Experiments besteht darin, dass die Photonen nach wie vor verschränkt sind.

Altewischers Team zieht aus der ohne Kohärenzverlust gelungenen Quantenverwandlung einen optimistischen Schluss: Offenbar sei es im Prinzip möglich, die Verschränkung von einzelnen Teilchen auf makroskopische Quanten-Ensembles und wieder zurück zu übertragen. Immerhin sind Plasmonen quantenmechanische Objekte, die aus rund zehn Milliarden Elektronen bestehen. Dass es gelingt, auch solche riesigen Gebilde zu verschränken, lässt die Chancen auf Quantencomputer ein wenig steigen. ◁

Michael Springer ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

ASTRONOMIE

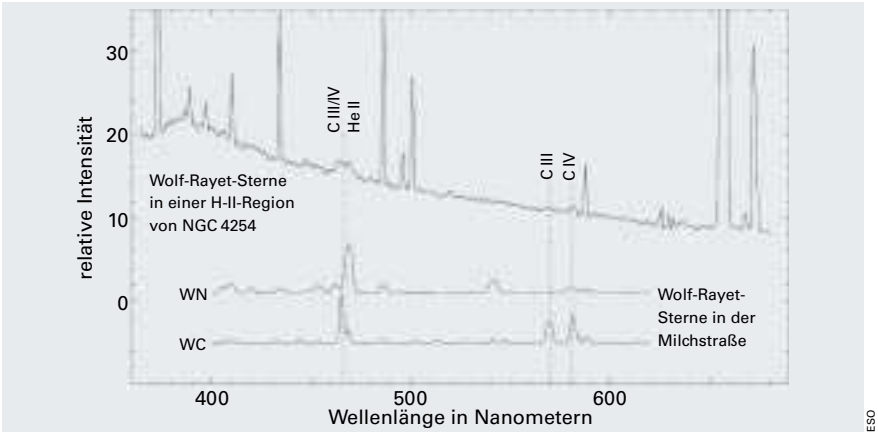
Wohlgenährte Sterne auch bei schwerer Kost

Beobachtungen mit dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte widerlegen bisherige Theorien, wonach extrem massereiche Sterne nur in Regionen entstehen können, die arm an schweren Elementen sind.

Von Georg Wolschin

Sterne mit hundert und mehr Sonnenmassen spielen eine besondere Rolle in der Entwicklung der Galaxien. Beim Urknall sind nur leichte Elemente wie Wasserstoff, Helium und Lithium-7 entstanden. Erst massereiche Sterne erzeugen durch Kernfusionsprozesse während ihres Lebens und durch die unausweichliche Supernova-Explosion bei ihrem fulminanten Ende auch die schwereren Elemente. Außerdem beeinflussen sie mit ihrer enormen Gravitationskraft die Materieverteilung in Galaxien. Und schließlich wirbeln sie durch ihre intensive Strahlung, ihren starken Sternenwind und ihre gewaltige finale Explosion die Molekül-, Gas- und Staubwolken in ihrer Umgebung heftig durcheinander.

Nach bisherigen Theorien können solche Sternriesen jedoch nicht in Regionen des Weltalls entstehen, in denen als Erbe früherer Sterngenerationen bereits größere Mengen schwerer Elemente vorkommen – Astronomen sprechen von »Metallen«. Die Begründung dafür klingt durchaus plausibel. Während Sterne aus einer Gas- und Staubwolke kondensieren, strahlen sie stark. Schwere Elemente absorbieren diese Strahlung besonders gut. Dadurch erhalten sie jedoch einen Impuls, der sie von dem jungen Stern wegtreibt. Die schweren Elemente werden also gleichsam davongeblasen. Dabei reißen sie in gewissem Ausmaß auch die leichteren Atome in der Gaswolke mit sich fort. Auf diese Weise schneiden sich die frisch gebackenen Sterne selbst



ESO

Die Spiralgalaxie NGC 4254 im Virgo-Cluster mit den untersuchten metallreichen H-II-Gebieten (blaue Kreise) in einer Aufnahme mit dem VLT der Europäischen Südsternwarte in Chile

von der Zufuhr an Materie ab, die sie bräuchten, um zu echten Schwergewichten mit mehr als 20 Sonnenmassen heranzuwachsen – so jedenfalls die Theorie.

Die Praxis sieht aber offenbar anders aus. Ein internationales Astronomenteam um Daniel Schaerer aus Toulouse hat jetzt erstmals auch in metallreichen Regionen, deren Gehalt an schweren Elementen ebenso hoch ist wie im Sonnensystem oder sogar noch höher, Sterne mit mindestens 60 bis 90 Sonnenmassen gefunden. Damit sind die bisherigen Vorstellungen nicht länger haltbar. Wo der Fehler steckt, ließ sich vorerst allerdings nicht klären.

Eigentlich wollten die Forscher nur einen Blick in die Sternen-Kinderstube von fünf Galaxien des etwa 50 Millionen Lichtjahre entfernten Virgo-Clusters werfen. Dazu untersuchten sie so genannte H-II-Regionen: Gaswolken, die sich durch hohe Konzentrationen an Wasserstoff auszeichnen, der durch die Strahlung junger Sterne ionisiert wurde. Sie sind extrem leuchtschwach und deshalb äußerst schwer zu beobachten. Dennoch gelang es mit dem 8,2-Meter-Teleskop Antu der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile und einem hochempfindlichen Spektrometer, optische Spektren davon aufzuzeichnen.

In nur einer Nacht konnten die Wissenschaftler auf diese Weise 85 metallreiche H-II-Regionen untersuchen. Zu ihrem eigenen Erstaunen entdeckten sie bei 27 davon den klaren spektralen Fingerabdruck so genannter Wolf-Rayet(WR)-Sterne und bei weiteren 15 zumindest Hinweise darauf. Aus unserer Milchstraße sind diese Objekte, die nach den französischen Astronomen Charles Wolf und Georges Rayet benannt wurden, bestens bekannt als späte Entwicklungsstadien besonders massereicher Sterne. Ihre Vorläufer haben durch noch nicht ganz geklärte Prozesse ihre wasserstoffreiche Hülle verloren und zeigen nun quasi ihren nackten Kern, an dessen Oberfläche die Produkte des Wasserstoff- oder Heliumbrennens zu sehen sind.

Das Spektrum massereicher Wolf-Rayet-Sterne in einer metallreichen H-II-Region der Spiralgalaxie NGC 4254 weist die charakteristischen Linien von ionisiertem Helium (He II) sowie von zwei- und dreifach ionisiertem Kohlenstoff (C III, C IV) auf. Zum Vergleich sind unten Spektren ähnlicher Sterne (WC, WN) in der Milchstraße gezeigt.

WR-Sterne verhalten sich geradezu selbstmörderisch: Sie senden heiße, dichte Sternwinde aus, die Endgeschwindigkeiten bis zu 3000 Kilometer pro Sekunde erreichen, und verlieren so pro Jahr ein Zehntausendstel einer Sonnen- oder das 33fache der Erdmasse. In ihrem Spektrum dominieren bis zu zehn Nanometer breite, sehr starke Emissionslinien. Sie überlagern ein blaues, zu kurzen Wellenlängen ansteigendes Kontinuum, das extrem hohen Temperaturen bis zu 90 000 Grad Celsius entspricht. Dadurch heben sich WR-Sterne deutlich von anderen Sternarten ab.

Man unterscheidet drei Subtypen. Je nachdem ob sie die Emissionslinie von Stickstoff (N), Kohlenstoff (C) oder Sauerstoff (O) zeigen, spricht man von WN-, WC- oder WO-Sternen. Meist treten mehrere Ionisationsstufen gleichzeitig auf, beispielsweise in WC-Sternen die Linie für zweifach ionisierten Kohlenstoff (C III) bei 569,8 und für die dreifach ionisierte Form (C IV) bei 580,8 Nanometern.

In unserer Galaxis haben WC-Sterne bisher etwa zehn Millionen Sonnenmassen an Kohlenstoff geliefert. Diese machen, durch die Sternwinde in den interstellaren Raum geweht, fast den gesamten Kohlenstoffgehalt der Milchstraße aus. Daraus wird die überragende Bedeutung von Wolf-Rayet-Sternen bei der Elemententstehung und der chemischen Entwicklung von Galaxien ersichtlich. Wenn sie auch in metallreichen Regionen entstehen können, hat das also gravierende Auswirkungen.

In den nun erstmals untersuchten H-II-Regionen des Virgo-Clusters zeigen 14 der 27 Gebiete mit Wolf-Rayet-Signatur die für WC-Sterne charakteristische C-IV-Emission. Auch hier sind demnach verschwenderische Kohlenstoff-Schleudern in Aktion. Sollte also jemals Erdöl auf einem extrasolaren Planeten in einer der Virgo-Galaxien gefunden werden, ist das nicht zuletzt den WC-Sternen zu verdanken. ◁

Georg Wolschin ist Physiker und Wissenschaftsjournalist; er lehrt an der Universität Heidelberg.

(Seiten 18 bis 20: Anzeige und Beihefter)

Kratzen auf atomarer Skala

Mit dem Rasterkraftmikroskop konnten Schweizer Forscher die mikroskopischen Vorgänge bei Reibung und Verschleiß genauer ergründen. Sie ritzten mit der feinen Nadel des Instruments winzige Kerben in Kristalle und bildeten sie dann in atomarer Auflösung ab.

Von Roland Bennewitz, Enrico Gnecco und Ernst Meyer

Reibung und Verschleiß sind Alltagsphänomene mit enormer technischer Bedeutung. Reibung führt zu Energieverlusten, weil gerichtete Bewegungsenergie in Wärme umgewandelt wird, und Verschleiß begrenzt die Lebensdauer aller mechanischen Geräte vom Automotor bis zur Festplatte im Computer. Deshalb hat die Erforschung dieser Phänomene eine lange Geschichte. Das dokumentieren schon Bilder vom Pyramidenbau aus dem Pharaonenreich: Um die Reibung großer Transportschlitten zu mindern, befeuchteten die alten Ägypter die Sandwege.

Das Universalgenie Leonardo da Vinci (1452–1519) hat erstmals physikalische Gesetze zur Reibung niedergelegt. Allerdings wurden sie nicht veröffentlicht und mussten so vom französischen Physiker Guillaume Amontons Ende des 17. Jahrhunderts wieder entdeckt werden. Die ersten Schritte auf der Suche nach den mikroskopischen Ursachen der Reibung machte Charles-Augustin de Coulomb, der die mikroskopische Rauheit der Oberfläche in seine Überlegungen einbezog. Tatsächlich wird die Reibung zwischen zwei Körpern durch Bildung, Verschiebung und Abriss einer Vielzahl von winzigen Einzelkontakten bestimmt.

Seit der Einführung der Rasterkraftmikroskopie lassen sich diese Vorgänge nun direkt beobachten. So wie die Nadel eines Plattenspielers aus der Geometrie der Rillen auf einer Schallplatte eine Sinfonie herausliest, kann die Spitze des Kraftmikroskops die atomare Struktur einer Oberfläche ertasten. Dabei kommt es zu einem so genannten Stick-slip-Verhalten: Wenn die Mikroskopspitze behutsam über eine ebene kristalline Fläche gezogen wird, bleibt sie jeweils an einer atomaren Position stecken (*stick*), bis die Zugkraft einen Schwellenwert übersteigt; dann springt sie zur nächsten solchen Position weiter (*slip*). Die Reibung ändert sich also mit der Periodizität des Atomgitters, das sich auf diese Weise abbilden lässt.

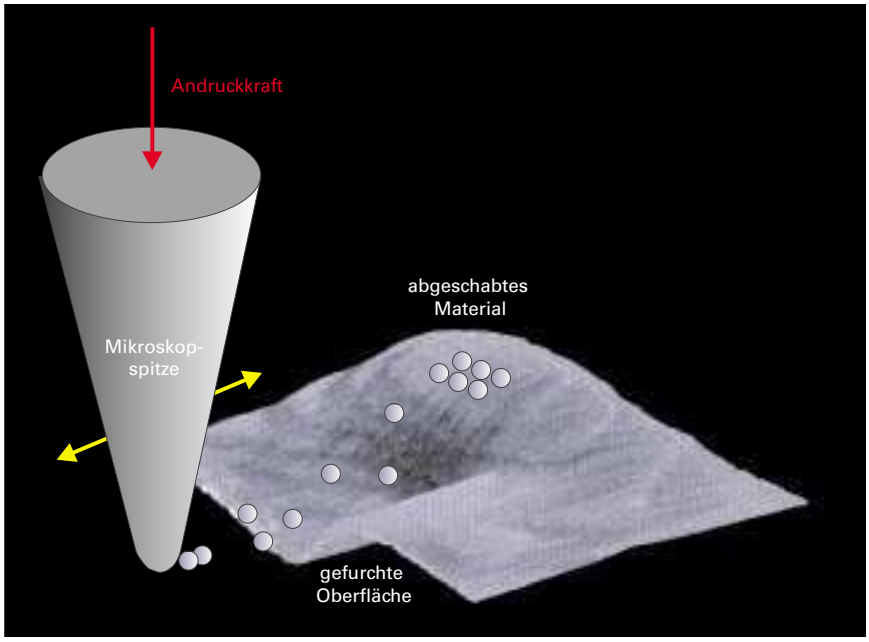
Wie Reibungswärme entsteht

Zwar handelt es sich dabei nicht um eine echte atomare Auflösung, da der Kontakt zwischen Spitze und Probe nicht nur aus einem, sondern aus vielen Atomen besteht. Reibungsexperimente zeigen trotzdem die Struktur des Atomgitters. Den Grund mag ein Vergleich verdeutlichen: Man könnte ja auch die Periodizität eines Eierkartons bestimmen, indem man einen anderen mit leichter Kraft darüber hinwegführt.

Stick-slip-Verhalten ist keineswegs auf den Mikrokosmos beschränkt. Es kommt genauso in unserer makroskopischen Alltagswelt vor – etwa bei einer quietschenden Bremse, die fest auf der Felge sitzt, bis die Kraft des sich weiterdrehenden Rades zu groß wird und sie ein Stück weiterrückt, und so fort. Die Frequenz der Wiederholung dieses Vorgangs nehmen wir als Schallwelle wahr.

Die Untersuchung von Reibung auf atomarer Skala ist daher keineswegs nur von akademischem Interesse. Das zeigten auch unsere ersten Experimente mit Metalloberflächen. Danach hängen atomare Reibung und Verschleiß entscheidend von der Ausrichtung der Oberfläche zum Kristallgitter ab. Nur wenn beispielsweise ein Kupferkristall parallel zu derjenigen Kristallebene geschnitten war, in der die Atome in ihrer dichtesten Packung vorliegen, konnten wir verschleißfrei ein atomares Stick-slip-Verhalten messen. An anderen Oberflächen desselben Kristalls kam es dagegen sofort zu starkem Materialabtrag und unregelmäßigen Sprüngen der Reibungskraft auf atomarer Skala.

Eine zentrale Frage ist, wie denn nun genau beim Reibungsprozess Wärme entsteht. Den resultierenden Energieverlust konnten wir mit dem Kraftmikroskop direkt ermitteln: Er ergibt sich aus dem Produkt der gemessenen Reibungskraft und dem Weg der Spitze. Wie wir feststellten, geht die Energie typischerweise beim Slip-Vorgang verloren. Anschaulich kann man sich vorstellen, dass die Spitze an den Oberflächenatomen zupft, über die sie rasch ▷



ROLAND BENNEWITZ, ERNST MEYER UND ENRICO GNECCO

Bei genügend hoher Andruckkraft beginnt die Spitze des Kraftmikroskops Atome aus der Oberfläche eines Kaliumbromid-Kristalls zu kratzen. Diese lagern sich, wie in der perspektivischen Darstellung der Originaldaten zu erkennen ist, am Ende des Kratzers in Form von atomar flachen Terrassen ab, welche exakt die Struktur des Kristalls darunter widerspiegeln.

hinweggleitet. Deren Bewegung wird aber sehr schnell auf alle benachbarten Atome übertragen und verliert sich in Gitterschwingungen, also in Wärme.

Auch Verschleiß lässt sich mit dem Kraftmikroskop in atomaren Dimensionen untersuchen. Dazu muss man die Andruckkraft der Spitze nur genügend steigern; irgendwann kratzt sie dann Atome aus der Oberfläche.

Wir haben dieses Anfangsstadium von Verschleiß an einem Kaliumbromid-Kristall genauer untersucht. Dazu ritzten wir zunächst mit relativ hoher Kraft einen Kratzer von wenigen Atomlagen Tiefe in die Oberfläche und rasterten diese dann bei geringem Auflagedruck ab. Auf diese Weise konnten wir nicht nur die Topografie der beschädigten Stelle, sondern dank des Stick-slip-Verhaltens auch ihre atomare Struktur darstellen. Um äußere Einflüsse wie den der Luftfeuchtigkeit zu minimieren, führten wir die Experimente in einer Vakuumkammer durch.

Im Kraftmikroskop verdrillt sich ein winziger Federbalken, wenn auf die Spitze an seinem Ende eine Reibungskraft einwirkt. Gemessen wird der Effekt anhand der Ablenkung eines am Balken reflektierten Lichtstrahls. Beim Stick-slip-Prozess springt die Spitze von einer atomaren Position zur nächsten, wenn die laterale Kraft groß genug wird. Die gespeicherte Feder-Energie geht als Wärme verloren.

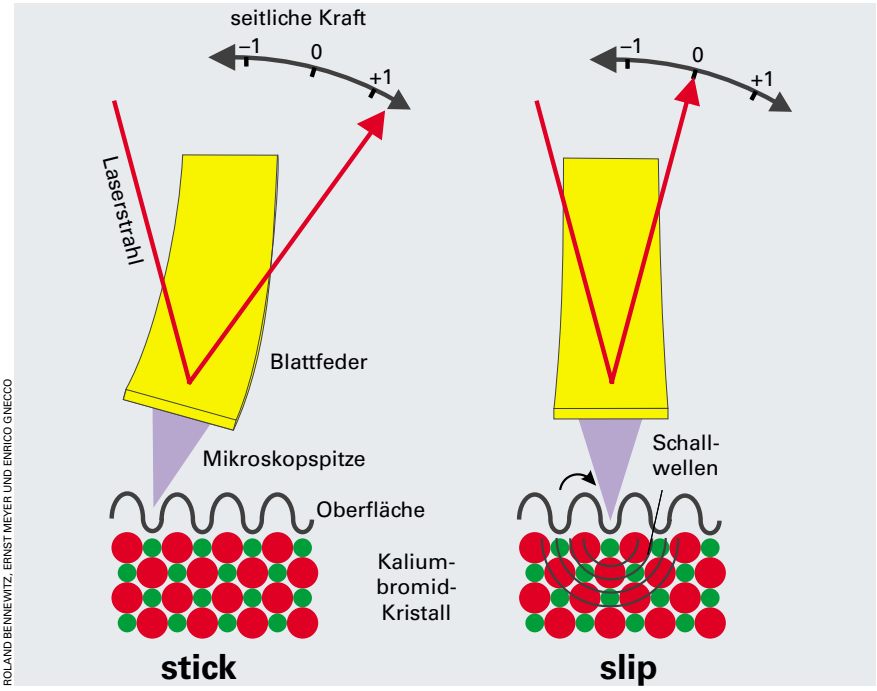
Zu unserer Überraschung lagen die abgetragenen Atome keineswegs regellos um den Kratzer herum, sondern bildeten Hügel aus geordneten Schichten, die sich perfekt der kristallinen Unterlage angepasst hatten. Offenbar bewegen sie sich auf der Oberfläche entlang, bis sie wieder eine reguläre Position im Kristallgitter eingenommen haben, wobei die Spitze des Kraftmikroskops diese Verlagerung vielleicht unterstützt. Diese neue Erkenntnis ist wichtig für Versuche, den Verschleißprozess zu simulieren. Entsprechende Modelle sollten berücksichtigen, dass die abgetragenen Atome quasi sofort wieder kristallisieren und dadurch eine gewisse Festigkeit zurückgewinnen.

Verschleiß kontra Reibung

Wenn Verschleiß auftritt, wie viel von der Bewegungsenergie zehrt er dann im Vergleich zur Reibung auf? Auch dies lässt sich mit dem Kraftmikroskop ermitteln. Dazu muss man nur die Topografie des Kratzers genau vermessen. Das Ergebnis verrät, wie viele Atome aus dem Kristall gelöst wurden. Die Summe ihrer Bindungsenergien in Relation zur gesamten eingesetzten Energie, die sich aus den Kraftmessungen ergibt, liefert den Anteil, der auf den Verschleiß entfällt. Wie wir feststellten, werden mehr als zwei Drittel der Energie durch Reibung gleich in Wärme verwandelt und nur ein Drittel dient zum Aufbrechen des Kristalls.

Unsere Untersuchungen über Energieverlust und Oberflächenmodifikation auf atomarer Skala werden sicherlich helfen, Reibung und Verschleiß auch im makroskopischen Bereich besser zu verstehen. Schließlich sind beide Welten oft eng verbunden. So liegt der Verschleiß in den Kolben moderner Motoren im Bereich eines Nanometers pro Stunde, was wenigen Atomlagen entspricht. Auch die Schutzschicht auf magnetischen Speicherplatten ist nur wenige Nanometer dick, damit sie das Auslesen der Bits in höchster Auflösung nicht behindert. Ihr Abrieb durch unfreiwillige Berührungen des Lesekopfs gehört zu den zentralen technologischen Problemen bei der Entwicklung von Festplatten.

Aber auch in den Nanowissenschaften könnten unsere Ergebnisse Bedeutung erlangen. So wäre denkbar, dass die beobachtete Rekristallisation der verschobenen Atome es den Nanotechnologen erheblich leichter macht, die von ihnen angestrebten winzigen Strukturen und Geräte zu konstruieren. ◁



ROLAND BENNEWITZ, ERNST MEYER UND ENRICO GNECCO

Reibungskraftmikroskopie

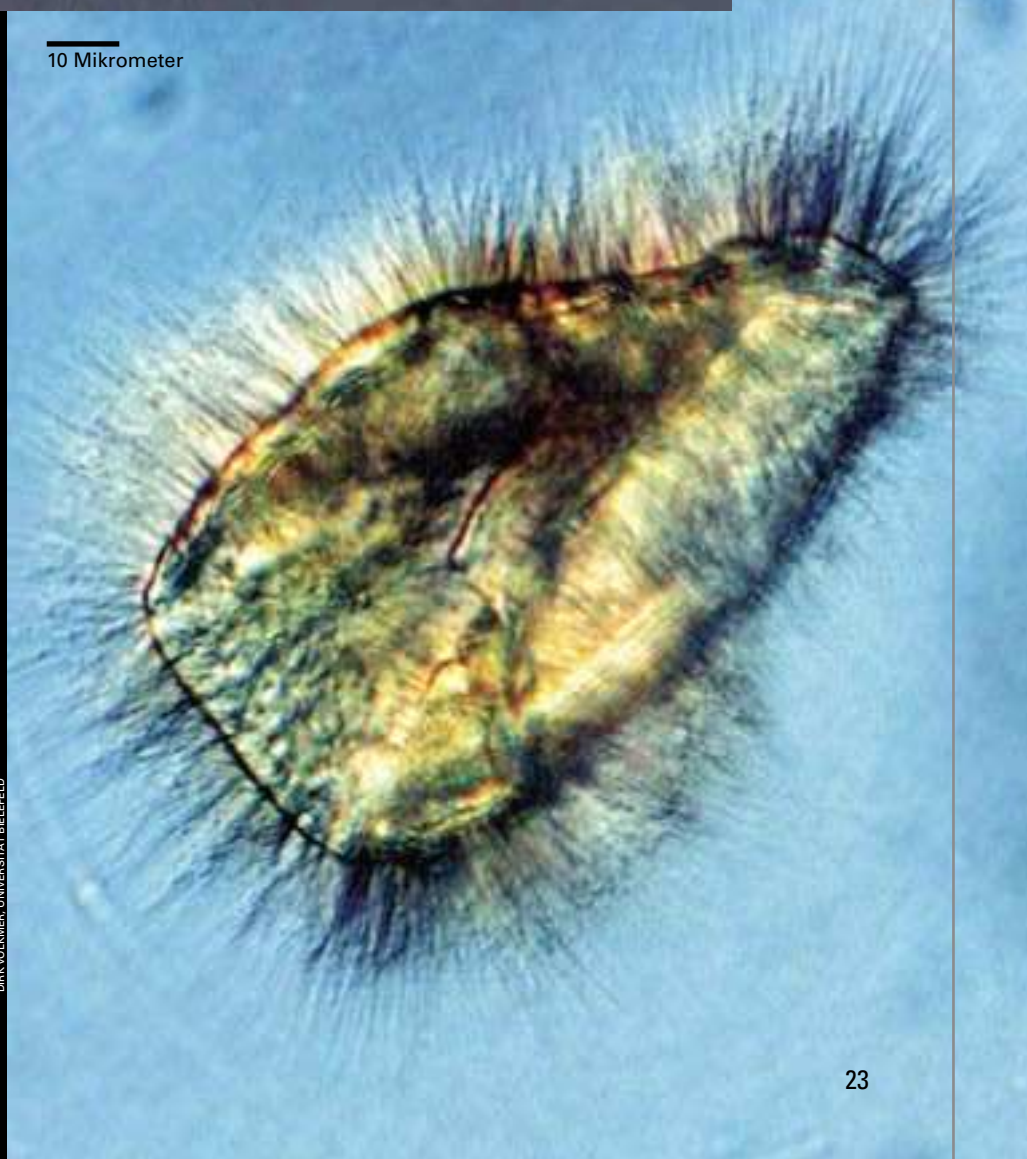
Eine extrem feine Spitze am Ende eines winzig kleinen Federbalkens wird seitlich über die zu untersuchende Oberfläche geführt. Ihre Andruckkraft äußert sich als vertikale Verbiegung, die Reibungskraft als Verdrillung des Balkens. An seiner Rückseite wird ein Lichtstrahl reflektiert, dessen Ablenkung als Messgröße dient. Benutzt man mikrofabrizierte Federbalken aus Silizium mit einer Länge von 400 Mikrometern und eine etwa 15 Mikrometer lange integrierte Spitze, so können kleinste Kräfte bis zu 0,01 Nanonewton gemessen werden. Zum Aufbrechen einer chemischen Bindung zwischen Atomen braucht man Kräfte in der Größenordnung von einem Nanonewton. Der Vergleich zeigt, dass das Mikroskop zumindest auf härteren Kristallen zerstörungsfreie Reibungsmessungen erlaubt.

Roland Bennewitz ist Privatdozent und **Ernst Meyer** Professor in der Abteilung »Kondensierte Materie« am Institut für Physik der Universität Basel. Zusammen mit **Enrico Gnecco**, der an der Universität Genua über Reibungskraftmikroskopie promoviert hat, erforschen sie im Rahmen des schweizerischen »Nationalen Forschungsschwerpunkts Nanowissenschaften« die Möglichkeiten, einzelne Moleküle und Atome zu erfassen, zu bewegen und anzuordnen.

Künstliche Mini-Igel

10 Mikrometer

Kunstvolle Gehäuse aus Siliciumdioxid (»Kieselsäure«) mit feinen strahlenförmigen Stacheln sind das Markenzeichen der Radiolarien oder Strahlentierchen. Es grenzt an ein Wunder, wie diese »Mini-Igel« aus formlosen anorganischen Materialien derart komplexe Strukturen aufbauen. Dirk Volkmer und seine Mitarbeiter an der Universität Bielefeld konnten es ihnen jetzt jedoch zumindest ansatzweise nachmachen. Dazu brachten sie winzige Öltröpfchen in Wasser ein, das eine Art Spülmittel enthielt. War dieses richtig dosiert, entstanden an der Tröpfchenoberfläche nach einigen Minuten wellenförmige Erhebungen, die zu kleinen »Stacheln« anwuchsen. Der Trick der Forscher bestand nun darin, dem Öl zugleich Vorstufen der beiden Mineralien Silicium- und Titandioxid beizumischen, die sich beim Kontakt mit Wasser zersetzen. Dadurch scheiden sie sich am Rand der »explodierenden« Tröpfchen als feste mineralische Schale aus. Damit die Mineralisation erst nach Bildung der Stacheln stattfindet, muss die Konzentration der Vorstufen genau stimmen. Dann aber entstehen Hohlschalen mit frappierender Ähnlichkeit zu Skeletten von Radiolarien.



10 Mikrometer

DIRK VOLKMER, UNIVERSITÄT BIELEFELD

Strings – Urbausteine der Natur?

Mit der Stringtheorie haben die Physiker offenbar eine mathematische Struktur entdeckt, die alle physikalischen Gesetze vereinigt. In neuen Teilchenbeschleunigern könnte die Theorie ihre ersten Tests bestehen.

Von Pierre Ramond

Wenn die Physiker in gigantischen Beschleunigern Elementarteilchen bei höchstmöglichen Energien kollidieren lassen, simulieren sie für winzige Augenblicke den Urknall – denn ganz am Anfang war das Universum ähnlich dicht und heiß. Bei solch enormen Energien ist die Welt offenbar einfach, regelmäßig und symmetrisch. Dem Kosmos scheint also ein relativ einfacher Urzustand zugrunde zu liegen, dem die Theoretiker durch möglichst allgemeingültige Gesetze auf die Spur kommen möchten.

Als die Naturforscher während der letzten 25 Jahre nach solchen Gesetzen suchten, ähnelte ihre Tätigkeit der eines Archäologen, der die reich verzierten Scherben einer Amphora findet und durch Zusammenfügen die ursprüngliche Gestalt zu erraten sucht: Er kombiniert die Bruchstücke so lange, bis sich trotz fehlender Fragmente ein stimmiges Ornament erkennen lässt. Ähnlich liegen dem Physiker zwei zwar schöne, aber unvollständige Teile einer allgemeinen Theorie vor: die Quantenchromodynamik zur Beschreibung der starken Kraft zwischen den Bausteinen der Kernteilchen – den Quarks – und die elektroschwache Theorie für Elektromagnetismus und schwache Kraft. Beide zusammen bilden das Standardmodell der Elementarteilchenphysik – das aber nicht vollständig ist, da es die Gravitation nicht zu beschreiben vermag. Der Physiker möchte dies alles nun auf möglichst elegante Art so zusammenfügen, dass sich eine umfassende »Theorie von Allem« ergibt.

Immerhin hat das Standardmodell drei Jahrzehnte der experimentellen Überprüfung praktisch unverändert überstanden; als Achillesferse hat sich nur kürzlich die Entdeckung erwiesen, dass das Neutrino im Gegensatz zum Modell eine kleine, von null verschiedene Masse besitzt. Mit Hilfe der so genannten Strings versuchen die Physiker nun schon seit längerer Zeit eine mathematische Struktur zu konstruieren, in die sich auch das sperrigste Stück – die Gravitation – einfügen lässt. Zunächst gab es mehrere konkurrierende Stringtheorien. Doch in den letzten Jahren haben die Theoretiker erkannt, dass es sich dabei nur um verschiedene Aspekte ein und derselben formalen Struktur handelt, die heutzutage Membran- oder kurz M-Theorie genannt wird.

Im Rahmen des Standardmodells beschreiben die Forscher die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen mit Hilfe der Yang-Mills-Theorien, benannt nach dem chinesisch-amerikanischen Physiker C. N. Yang und seinem Kollegen Robert L. Mills. Die Kräfte werden dabei durch Feldquanten vermittelt – masselose Teilchen mit ganzzahligem Spin, so genannte Bosonen. Sie heißen insbesondere Eichbosonen, denn ihre Eigenschaften ergeben sich aus Symmetrieeigenschaften, denen die Materie unter so genannten Eichtransformationen gehorcht.

Die starke Kraft macht sich als Anziehung zwischen den Kernteilchen – Protonen und Neutronen – bemerkbar, die ihrerseits aus Quarks zusammengesetzt sind. Die starke Wechselwirkung zwischen den Quarks hängt von speziellen Quantenzahlen dieser Teilchen ab, den so genannten Farbladungen. Diese »Farben« lassen

SERIE

25 Jahre Spektrum DER WISSENSCHAFT

In dieser 12-teiligen Serie berichten prominente Forscher aus ihrem Fachgebiet über wissenschaftliche Highlights der letzten 25 Jahre, die aktuelle Situation und künftige Perspektiven.

Teil I: Paläoanthropologie
Teil II: String-Physik

Im nächsten Heft
Teil III: Gehirnforschung

sich durch eine Gruppe von Transformationen ineinander überführen, denen acht verschiedene Wechselwirkungsteilchen entsprechen, die Gluonen (von englisch *glue*, Leim).

Ähnlich hängen zwei andere Symmetriegruppen des Standardmodells mit den Trägern der elektroschwachen Kraft zusammen: mit dem Photon, dem Feldquant des Elektromagnetismus, sowie den Bosonen Z^0, W^- und W^+, den Quanten der schwachen Kraft. Im Rahmen der Yang-Mills-Theorien ist die Reichweite dieser Wechselwirkungen unendlich; gemäß der Quantenmechanik folgt daraus, dass die Masse der vermittelnden Teilchen null sein muss. Bei hohen Energien ist das tatsächlich der Fall, aber in unserem alten und kalten Universum ist nur noch das Photon masselos, und die zugehörige elektromagnetische Kraft hat dementsprechend unendliche Reichweite. Die Bosonen Z^0, W^- und W^+ besitzen dagegen von null verschiedene Massen und vermitteln eine schwache Kraft mit kurzer Reichweite.

Diese Eigenschaft bricht die elektroschwache Symmetrie, sodass die schwache Kraft – verantwortlich für Phänomene wie den radioaktiven Beta-Zerfall des Atomkerns – völlig verschieden ist von der elektromagnetischen Wechselwirkung. Was aber verursacht bei niedrigen Energien die endlichen Massen der Bosonen Z^0, W^- und W^+? Um dieses Problem zu lösen, haben die Physiker im Standardmodell ein hypothetisches Partikel mit Spin null eingeführt, das Higgs-Boson. Es soll mit den Feldquanten in Wechselwirkung treten und ihnen dadurch ihre tatsächlich beobachteten Massen verleihen.

AKG BERLIN / ERICH LESSING

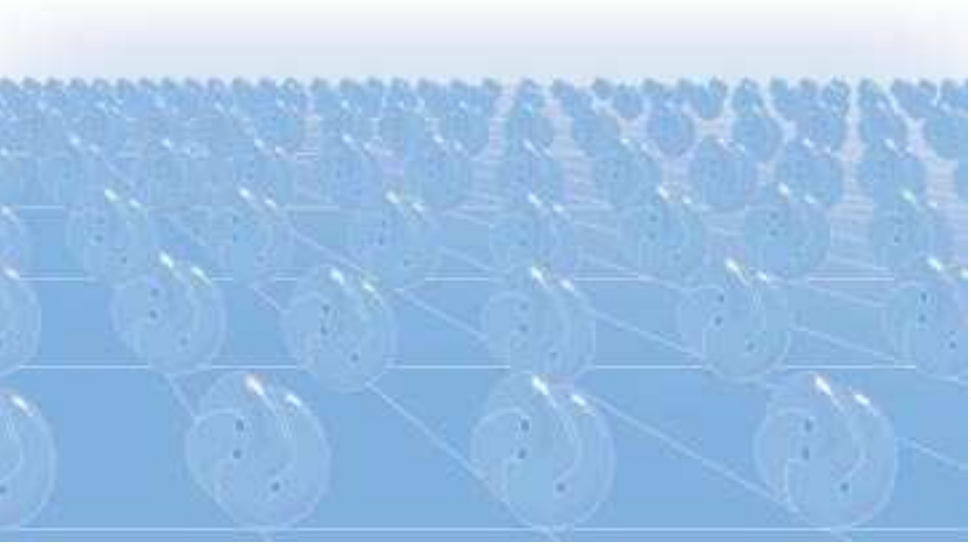
Auf diesem Gemälde von Raffael zeigt der antike Philosoph Platon zum Himmel, um anzudeuten, die physische Welt sei nur ein unvollkommenes Abbild reiner Ideen. Auch die Stringtheoretiker erforschen eine rein mathematische Struktur, aus der die Gesetze des Universums folgen sollen. Aristoteles, der große Naturbeobachter, deutet hingegen vor sich auf die Erde, als wollte er die hochfliegenden Ideen seines Lehrers mäßigen. Heute setzen Stringtheoretiker und Experimentalphysiker diesen antiken Dialog mit modernen Mitteln fort.

Vereinte Kräfte

Das Verhalten der Photonen und der Bosonen Z^0, W^- und W^+ zeigt, dass sich die Natur erheblich vereinfacht, wenn man die Energie erhöht, also ähnliche Bedingungen wie beim Urknall produziert: Die schwache und die elektromagnetische Kraft vereinen sich dann zur elektroschwachen Kraft. Die Physiker sind überzeugt, dass sich bei genügend hohen Energien sogar alle drei fundamentalen Kräfte des Standardmodells – starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkung – zu einer einzigen Kraft vereinen. Doch diese »große Vereinigung«, der als Theorie eine künftige Grand Unified Theory (Gut) entspräche, dürfte vermutlich erst bei einer Energie von der Größenordnung 10^{16} Milliarden Elektronenvolt (Gigaelektronenvolt, GeV) pro Teilchen zu Tage treten.

Das Standardmodell lässt viele Fragen offen: Warum spielen einige Arten von Symmetrie eine besondere Rolle? Warum gibt es nur drei Familien von Materiepartikeln – und nicht nur eine einzige oder unendlich viele? Auf welchem Prinzip beruht die Existenz des Higgs-Bosons, und wie lassen sich die genauen Massenwerte erklären, die es den Teilchen verleiht? Außerdem ist die Energie, bei der sich die »große Vereinigung« ereignen soll, viel höher als diejenige, welche der Masse des schwersten Quarks, des Top-Quarks, entspricht. Für die Theoretiker, die stattdessen eine ähnliche Größenordnung erwartet hätten, bildet dieses »Hierarchieproblem« eines der größten Rätsel der Elementarteilchenphysik. Das Standardmodell beschreibt somit zwar unser Universum einige Sekundenbruchteile nach seiner Entstehung recht gut, erklärt aber nicht seine Struktur – und dann ist da natürlich noch das Problem der Gravitation.

Im Standardmodell berechnet man die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses, indem man, den Regeln der Quantentheorie folgend, die Wahrscheinlichkeiten für alle Realisierungsmöglichkeiten dieses Ereignisses aufsummiert. Oft erhält man auf diese Weise jedoch ein unendlich großes Resultat. Die Physiker haben eine Methode gefunden – die so genannte Renormierung –, die ihnen erlaubt, diese Unendlichkeiten wieder loszuwerden. Unglückli- ▷



ALLE GRAFIKEN: POUR LA SCIENCE

Einigen Stringtheorien zufolge besitzt unser Raum drei unendliche und sechs eingerollte Dimensionen. Jeder Punkt unseres Universums wäre demnach ein winziger sechsdimensionaler Raum – so wie ein Zylinder von weitem wie ein Faden aussieht, dessen »Punkte« in Wirklichkeit Kreise sind. Hier ist ein vierdimensionaler Raum dargestellt, dessen zwei unendliche Dimensionen eine Ebene bilden; jeder Punkt der Ebene ist seinerseits eine kompakte Fläche in den übrigen zwei Dimensionen.

▷ cherweise lässt sich dieses Verfahren nicht auf die Gravitation anwenden: Anscheinend ist es unmöglich, die Allgemeine Relativitätstheorie quantenmechanisch zu formulieren, ohne unaufhebbare Unendlichkeiten zu erzeugen.

Solche Quantengravitationseffekte tauchen allerdings erst bei Energien von rund 10^{18} GeV auf – dem Hundertfachen der Energie der großen Vereinigung. Die einzelnen Teile des Standardmodells fügen sich also zu einer halbwegs vollständigen Amphora, solange die Gravitation keine Quanteneigenschaften zeigt. Um die Vereinheitlichung aller Kräfte – den unerfüllten Traum Einsteins – zu verwirklichen, sind völlig neuartige Theorien nötig: die Stringtheorien.

Schon 1968 suchten einige Physiker die Quantenfeldtheorie so zu modifizieren, dass sie die starke Kraft zwischen Protonen und Neutronen zu erklären vermochte. Dieser Versuch wurde zwar bald zugunsten der Quantenchromodynamik aufgegeben, aber einige Forscher bemerkten, dass die neue Gleichung die Elementarteilchen wegen der quantenmechanischen Welle-Teilchen-Dualität auf verschiedene Moden von Schwingungen sehr kleiner »Fäden« (englisch strings) zurückführt. Diese Strings, die sowohl gestreckt (»offen«) als auch ringförmig (»geschlossen«) sein können, schwingen allerdings in einem Raum von 25 Dimensionen. Weist dieser Ansatz vielleicht den Weg zur gesuchten allumfassenden Theorie, die alle Bruchstücke zusammenfügt? Ja und nein.

Einerseits ja: Die Stringtheorie sagt nicht nur die Existenz von masselosen Teilchen mit Spin eins voraus, die man als die Eichbosonen des Standardmodells ansehen könnte, sondern auch Elementarteilchen mit Spin zwei, ebenfalls ohne Masse, die alle charakteristischen Eigenschaften des Gravitons aufweisen, des Austauschteilchens der Schwerkraft. Um eine Gravitation passender Stärke zu erzeugen, dürfen die Strings nur rund 10^{-35} Meter lang sein. Tatsächlich entdeckten die Physiker, dass im Rahmen einer solchen Theorie die Unvereinbarkeit zwischen Relativitätstheorie und Quantenmechanik verschwindet.

Andererseits nein: Leider waren einige Vorhersagen der Theorie völlig inakzeptabel, insbesondere die des Tachyons, eines Teilchens mit Überlichtgeschwindigkeit. Darüber hinaus existieren in der Theorie keine Fermionen, das heißt Teilchen mit halbzahligem Spin – und somit keine normale Materie!

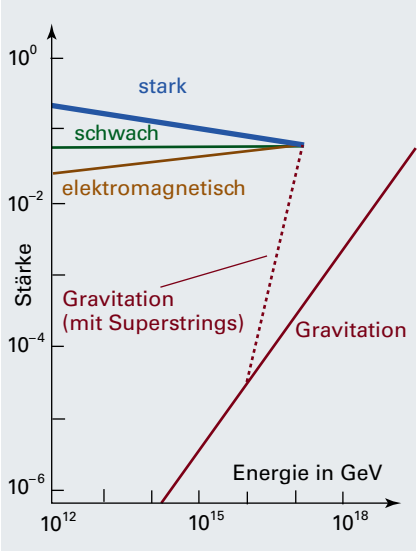
Die Theoretiker konnten diese Unzulänglichkeit jedoch beheben, indem sie eine neue Art der Symmetrie einführten, die sie »Supersymmetrie« nannten. Diese Symmetrie tauscht Bosonen (Teilchen mit ganzzahligem Spin) und Fermionen (mit halbzahligem Spin) gegeneinander aus. So entstand die Superstringtheorie, in der es nicht nur die Feldquanten des Standardmodells und die Gravitonen mit Spin zwei gibt, sondern auch Fermionen mit halbzahligem Spin. Außerdem enthielt diese Theorie wie durch ein Wunder keine Tachyonen mehr. Und nebenbei reduzierte sich die Anzahl der Raumdimensionen auf »nur« noch neun.

Fünferlei Superstrings

Aber leider mussten die Physiker feststellen, dass diese Theorie immer noch einen großen Fehler enthielt: Sie war nicht »chiral«. In der Realität wechselwirken W- und Z-Bosonen auf unterschiedliche Art mit »rechtshändigen« und »linkshändigen« Fermionen, die sich durch ihre Spin-Orientierung unterscheiden: Die Partikel verhalten sich nicht wie ihr räumliches Spiegelbild. Die ursprüngliche, Typ I genannte Theorie machte diesen Unterschied nicht. Also wurden neue Theorien vom Typ IIA und IIB aufgestellt. Sie enthalten geschlossene Strings, sind supersymmetrisch und erfordern ebenfalls neun Dimensionen. Eine von ihnen, IIB, ist sogar chiral; aber in ihr gibt es wiederum keine Eichbosonen, das heißt keine Wechselwirkungsquanten.

Erst nach 1984 begannen die Theoretiker, im Universum aller möglichen Stringtheorien Inseln zu entdecken, deren Eigenschaften den physikalischen Gesetzen besser entsprechen. So stießen sie auf zwei Theorien mit geschlossenen Strings, so genannte heterotische Stringtheorien, die jeweils mit einer eigenen Eichsymmetriegruppe ausgestattet sind. Eine von ihnen verdient besondere Aufmerksamkeit: Sie beruht auf einer Symmetriegruppe namens $E8 \times E8$, die

Die Supersymmetrie ordnet jedem Materieteilchen – einem Fermion mit halbzahligem Spin – ein hypothetisches Boson mit ganzzahligem Spin zu, sowie umgekehrt jedem Wechselwirkungsquant oder Boson ein hypothetisches Fermion. Diese Symmetrie löst zwar mehrere theoretische Probleme, wirft aber die Frage auf, warum wir die zusätzlichen Teilchen noch nie bemerkt haben.



Wechselwirkung	Eichsymmetrie	Boson
elektromagnetisch	**Gruppe U(1):** Physikalische Gesetze sind invariant gegen Phasenverschiebung	Photon, Spin 1, Masse 0
schwach	**Gruppe SU(2) :** Die Leptonen (Elektronen und Neutrinos) sind vertauschbar	W^+ und W^-, Spin 1, Masse 83 Gev
elektroschwach	**Gruppen SU(2) und U(1) :** Theorie der elektroschwachen Vereinigung	W^+, W^- und Z^0, Spin 1, Masse 93 Gev
stark	**Gruppe SU(3) :** Physikalische Gesetze sind invariant gegenüber Permutation der »Farbe«	Gluonen, Spin 1, Masse 0
Gravitation	**Relativitäts- und Äquivalenzprinzip:** Invarianz gegenüber Wechsel des Bezugssystems	Graviton, Spin 2, Masse 0

alle drei Symmetrien des Standardmodells umfasst und somit die Existenz der entsprechenden Eichbosonen vorhersagt. Sie ist supersymmetrisch und sieht die Existenz von Materie vor. Außerdem ist sie chiral wie die Naturgesetze, und sie enthält zusätzlich zu den Kräften des Standardmodells die Gravitation. Dies war die erste Superstringtheorie, die auf die reale Welt anwendbar zu sein schien.

Somit gibt es heute fünf Superstringtheorien: eine Theorie mit offenen und geschlossenen Strings, genannt Typ I, sowie vier Theorien mit geschlossenen Strings: die Typen IIA und IIB und zwei Theorien mit heterotischen Strings. Allen ist gemeinsam, dass sie die Supersymmetrie einführen und vom Universum fordern, dass es neun statt drei räumliche Dimensionen besitzt.

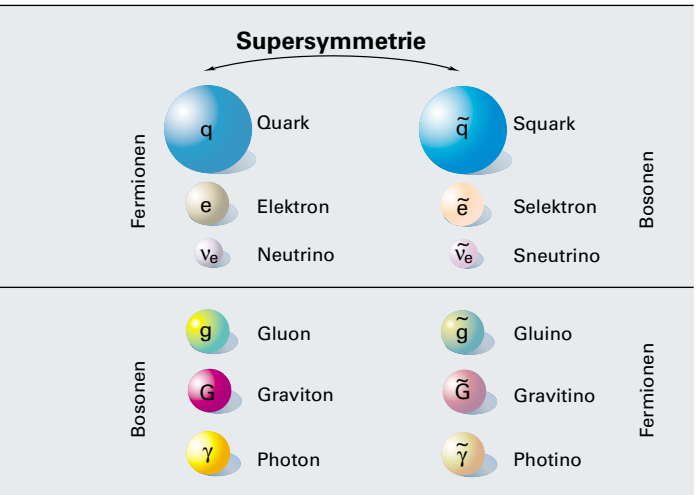
Bisher konnten die Experimentalphysiker allerdings keine supersymmetrischen Spiegelbilder der herkömmlichen Elementarteilchen nachweisen – weder Bosonen mit Spin null namens Squarks, Selektronen und Sneutrinos noch Fermionen mit Spin einhalb namens Photino, Gluino und so weiter. Falls die Supersymmetrie bei hohen Energien tatsächlich existiert, muss sie bei den uns heute erreichbaren Energien so gebrochen sein, dass wir nur die Hälfte aller möglichen Teilchen sehen, nämlich die Fermionen und Bosonen des Standardmodells. Zudem haben wir noch niemals die Existenz zusätzlicher räumlicher Dimensionen festgestellt.

Zunächst: Warum sehen wir nur drei Raumdimensionen? Darauf könnte es zwei extreme Antworten geben: Entweder sind die zusätzlichen Dimensionen so winzig, dass wir sie nicht bemerken – oder sie sind zwar unendlich groß, aber für uns unzugänglich.

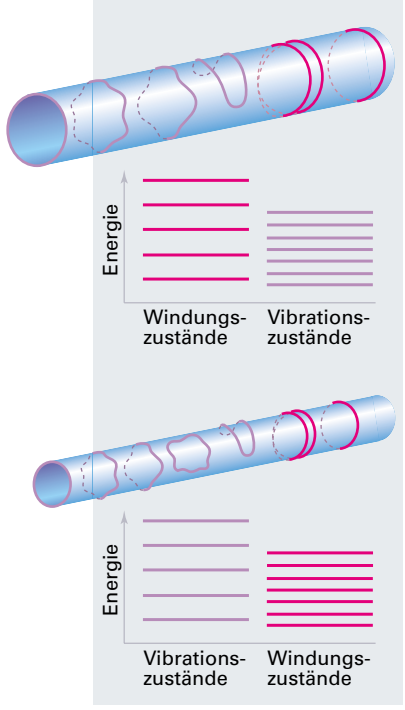
Im ersten Fall betrachten die Forscher Räume, bei denen einige Dimensionen »kompaktifiziert« sind, das heißt eng zusammengerollt. In unserem Universum gäbe es dann drei unendlich ausgedehnte sowie sechs zusätzliche, eingerollte Dimensionen. Betrachten wir der Einfachheit halber einen zweidimensionalen Raum, bei dem eine Dimension unendlich ist und die andere einen kleinen Kreis mit Radius R bildet. Von weitem sieht dieser Raum wie eine eindimensionale Linie aus. Erst aus großer Nähe – bei einer Auflösung der Größenordnung R – lässt sich erkennen, dass es sich in Wirklichkeit um einen unendlich langen Zylinder handelt, also um eine zweidimensionale Fläche.

Die Quantenmechanik lehrt, dass wir, um eine Länge der Größenordnung R zu erforschen, eine Energie der Größenordnung hc/R brauchen, wobei h die Planck'sche Konstante und c die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Um winzige zusätzliche Dimensionen der Größenordnung 10^{-35} Meter nachzuweisen, wären also enorme Energien nötig, die selbst die größten Teilchenbeschleuniger bei weitem nicht aufbringen. ▷

Die fundamentalen Naturkräfte rühren von bestimmten Symmetrien her, denen die materiellen Teilchen gehorchen. Dem Standardmodell zufolge vereinigen sich die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung zur elektroschwachen Kraft; bei Energien über 10^{16} Milliarden Elektronenvolt (GeV) folgt ihnen die starke Kraft. Die Gravitation passt nicht in den Rahmen der üblichen Quantentheorie und ist so schwach, dass das Standardmodell keine »große Vereinigung« bei hohen Energien vorhersagt. Erst die Superstrings könnten diese Probleme lösen.



Ein Raum, in dem eine zusätzliche Dimension zu einem Kreis eingerollt ist, enthält Strings, deren Energieniveaus entweder von Vibrationszuständen (violett) herrühren oder von der Anzahl der Windungen um die zusätzliche Dimension (rosa). Die Niveaus entsprechen unterschiedlichen Teilchen. In gewissen »dualen« Theorien sind die Niveaus für einen Kreis mit Radius R dieselben wie für einen Kreis mit Radius $1/R$, nur sind Vibrations- und Windungszustände vertauscht.



POUR LA SCIENCE

Das Studium der Geometrie und Topologie unterschiedlich kompaktifizierter Dimensionen hat sich dennoch als sehr fruchtbar erwiesen. Wenn eine zusätzliche Dimension auf einen Kreis vom Radius R aufgerollt ist, hängt die Energie der Strings von zwei Faktoren ab: von den Schwingungen, die sie vollführen, und von der Art, wie sie um den Zylinder gewickelt sind. Die Oszillationen ergeben je nach dem Vibrationsmodus eine Serie von immer höheren Energiezuständen.

Die Art des Aufrollens der Strings liefert eine andere Serie von diskreten Zuständen; die Energie dieser so genannten Windungszustände hängt von der Anzahl der Wicklungen um die zusätzliche Dimension ab. Unterdessen haben die Theoretiker entdeckt, dass die Strings in einem Raum mit Radius R identisch sind mit denen in einem Raum mit Radius $1/R$; der einzige Unterschied ist, dass Vibrations- und Windungszustandsserien vertauscht sind.

Die Forscher konnten noch tiefere Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Stringtheorien und den eingerollten Dimensionen zu Tage fördern. So ist die Theorie der heterotischen Strings in einem Raum, der zu einem vierdimensionalen Torus eingerollt ist, identisch mit der Stringtheorie des Typs IIA in einem Raum, der auf einer vierdimensionalen Mannigfaltigkeit namens K3 kompaktifiziert ist. Solche Zusammenhänge sind für die Theoretiker sehr nützlich: Wenn ein Problem in einer bestimmten Topologie nicht berechenbar ist, kann man auf ein anderes Universum mit anderer Topologie ausweichen, in dem die Rechnungen einfacher sind.

Wenn man nun versucht, die Stringtheorie auf unser Universum im Allgemeinen und auf das Standardmodell im Besonderen anzuwenden, bildet der Raum der zusätzlichen Dimensionen keinen einfachen Kreis mehr, sondern eine sechsdimensionale Mannigfaltigkeit. Gesucht sind nun die Eigenschaften, die eine solche Mannigfaltigkeit haben muss, um unsere physikalische Welt zu reproduzieren. Für die Theorie der heterotischen Strings mit Symmetriegruppe E8 × E8 – jene Theorie also, die der Realität am nächsten kommt – muss die Mannigfaltigkeit zu einer bestimmten Familie von Räumen gehören. Unglücklicherweise ist dies eine sehr große Familie, und wir wissen nicht genug, um die Form der zusätzlichen Dimensionen zu bestimmen. Das heißt, wir müssen aus all diesen Möglichkeiten die eine erraten, die auf unsere Realität zutrifft.

Die zweite prinzipielle Möglichkeit ist, dass wir unterstellen, die zusätzlichen Dimensionen seien unendlich. In diesem Zusammenhang bezeichnet das aus dem Wort Membranen hergeleitete Kunstwort »n-Branen« gewisse n-dimensionale Unterräume eines Basisraums von neun oder mehr Dimensionen. Die Branen sind Lösungen der Theorien des Typs I und II, an die sich die offenen Strings anheften. So gesehen gleicht unser Universum einem dreidimensionalen Fahnentuch; es flattert gleichsam in einem größeren Basisraum, in dem sich die geschlossenen Strings – beispielsweise das Graviton – aufhalten. An dem Fahnentuch selbst haften die offenen Strings, das heißt die Elementarteilchen des Standardmodells – und somit unweigerlich auch wir.

Einige Physiker vermuten, dass solche Theorien die Frage beantworten könnten, warum die Gravitation so erstaunlich schwach ist. Die Gravitonen – die geschlossenen Strings – hätten einen viel größeren Raum zur Verfügung als die Elementarteilchen des Standardmodells, das heißt die offenen Strings. Darum wären die Kräfte des Standardmodells und die Gravitation zwar im Basisraum von gleicher Intensität, doch weil die Gravitonen sich auch in den zusätzlichen Dimensionen frei bewegen könnten, würden sie unser dreidimensionales Universum seltener passieren, und darum würde die Gravitation den Bewohnern unserer Brane so viel schwächer erscheinen.

Warum ist die Schwerkraft so schwach?

Träfe diese These zu, so könnten gravitative Effekte vielleicht schon bald in den größten Teilchenbeschleunigern sichtbar werden – im Tevatron am Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) in Batavia (Illinois) und im Large Hadron Collider (LHC), der am europäischen Labor für Teilchenphysik (Cern) bei Genf im Bau ist. Allerdings hängen die experimentellen Vorhersagen von der Form des Raumes der zusätzlichen Dimensionen ab sowie von der – noch unbekannten – Energieschwelle, über der sie sich offenbaren.

Die Supersymmetrie, die Fermionen und Bosonen vertauscht, ist zwar unerlässlich für die Stringtheorie – aber gilt sie auch für die Natur? Warum müssen wir an eine Symmetrie glauben, die wir noch nie beobachtet haben und von der wir immer noch nicht wissen, wodurch sie bei normalen Energien gebrochen wird?

Immerhin gibt es eine Reihe von Argumenten, die für die Supersymmetrie sprechen. Einerseits sind es ihre erstaunlichen formalen Eigenschaften. So ist es beispielsweise in einer vierdimensionalen Raumzeit möglich, eine Feldtheorie namens (N = 4)-Super-Yang-Mills zu konstruieren, in der die Unendlichkeiten des Standardmodells sogar ohne Renormierung vermieden werden können. Diese Theorie beschreibt zwar nicht die Natur, aber die Physiker werden den Gedanken nicht los, dass sie zumindest ein Element des gesuchten Puzzles ist.

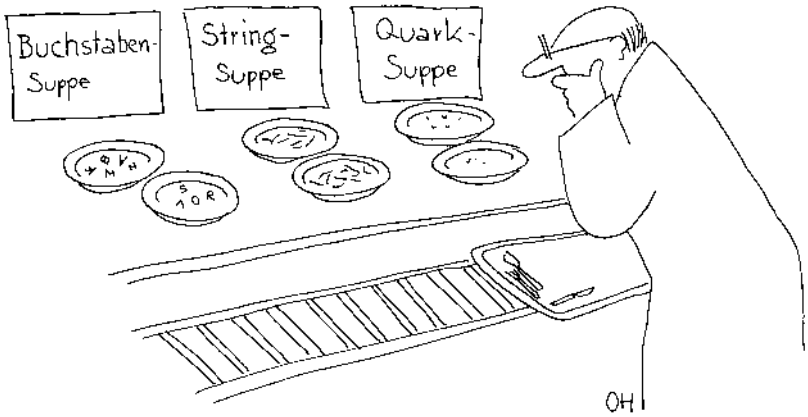
Außerdem liefert uns diese Theorie eine angenehme Überraschung: In einem dreidimensionalen Raum ist sie äquivalent mit der Gravitationstheorie, die sich aus der in einem vierdimensionalen Raum formulierten Superstringtheorie vom Typ IIB ergibt. Somit besitzen wir eine Yang-Mills-Eichtheorie in drei Dimensionen, die der Quantentheorie der Gravitation in vier Dimensionen gleichwertig ist. Ist dies möglicherweise eine Verbindung zwischen der Gravitation und den anderen Kräften des Standardmodells?

Wenn die Supersymmetrie auf das Standardmodell angewandt wird, erklärt sie auch, warum das Higgs-Boson so leicht ist, dass es schon bald in unseren Beschleunigern nachgewiesen werden könnte. Und schließlich ergibt sich dank der Supersymmetrie ganz von selbst die große Vereinigung des Standardmodells, das heißt das Verschmelzen seiner drei Kräfte zu einer einzigen. Denn das Hinzufügen der supersymmetrischen Partner korrigiert die Entwicklung der Kräfte derart, dass deren Vereinigung bei ein und derselben Energie stattfindet. Nun hoffen die Forscher, in den nächsten Jahren die Spuren von supersymmetrischen Partnern der Elementarteilchen in Beschleunigern nachweisen zu können.

Wie die Physiker in den neunziger Jahren erkannten, ergibt die Supergravitation – die supersymmetrische Theorie der Quantengravitation – mit zehn räumlichen Dimensionen, die durch Kompaktifizieren einer Dimension auf neun Dimensionen reduziert werden, unter gewissen Bedingungen die masselosen Partikel der Theorie IIA. Daraus wurde geschlossen, dass in einer elfdimensionalen Raumzeit (mit zehn Raumdimensionen und einer Zeitdimension) eine Theorie existiert, die – einfach kompaktifiziert – alle Vorhersagen der Theorie vom Typ IIA liefert. Die Entdeckung anderer Dualitäten derselben Art lässt heute keinen Zweifel mehr daran, dass es diese mathematische Struktur, die so genannte M-Theorie, tatsächlich gibt. Wir glauben sogar, dass sämtliche Superstrings Manifestationen der M-Theorie sind.

Seefahrer, die einen Kontinent entdecken

Insofern gleichen wir den Seefahrern, die im 16. Jahrhundert entdeckten, dass ihre Landeplätze jenseits des Atlantischen Ozeans die Karte eines einzigen riesigen Kontinents ergaben, den sie Amerika nannten. Ähnlich begreifen wir heute, dass unsere Forschungen seit dreißig Jahren zu einer einzigartigen mathematischen Struktur vorstoßen, die offenbar eng mit den fundamentalsten Gesetzen des Universums zusammenhängt. Wir tasten uns zu einem unerwarteten und folgenreichen Gebilde vor, das für die Physik so bedeutsam und grundlegend sein dürfte wie die DNA-Struktur für die Biologie. Die exakten Zusammenhänge haben wir allerdings noch nicht verstanden. Wir fahren also fort, die fundamentale Struktur durch ihre Projektionen auf eine zehndimensionale Raumzeit zu erforschen – wie die Höhlenbewohner in Platons berühmtem Gleichnis, die von der Welt nur deren Schatten an den Höhlenwänden sehen.



Die Stringtheorien haben uns gelehrt, dass es möglich ist, die Gravitation in die Beschreibung der fundamentalen Kräfte zu integrieren, ohne die Quantenmechanik neu zu formulieren – freilich unter der Bedingung, dass wir die Existenz zusätzlicher räumlicher Dimensionen annehmen und voraussetzen, dass die Welt der Supersymmetrie gehorcht. Wir wissen weder, wie die Supersymmetrie gebrochen wird, noch, wodurch die zusätzlichen Dimensionen für uns unsichtbar werden. Außerdem liefern die Theorien keine detaillierten, experimentell nachprüfbaren Vorhersagen.

Dennoch bleibt die Erforschung der Strings ein spannendes Abenteuer: Vor unseren Augen enthüllt sich allmählich eine mysteriöse mathematische Struktur durch einen Prozess, der viel mehr einer Entdeckung als einer Erfindung gleicht. Unsere Nachfahren werden einst wissen, ob dies die ersten tastenden Versuche zur Formulierung einer fundamentalen Theorie sind, die wir uns gegenwärtig noch nicht vorstellen können.

Die Teilchenphysik macht gegenwärtig eine Phase durch, in der die theoretischen Fortschritte den experimentellen Fähigkeiten weit vorauseilen. Ohne die Hilfe neuer Beschleuniger werden sich unsere Theorien immer mehr von der physikalischen Realität entfernen. Darum gilt es, die experimentelle Forschung zügig voranzutreiben – mit dem Tevatron am Fermilab und mit dem Large Hadron Collider bei Cern. Nur wenn wir gleichsam die Sehnsucht Platons nach reinen Ideen mit dem handfesten Pragmatismus des Aristoteles zähmen, werden wir erfahren, ob unsere Welt im Innersten tatsächlich aus mehrdimensionalen Strings und Membranen besteht. ◁

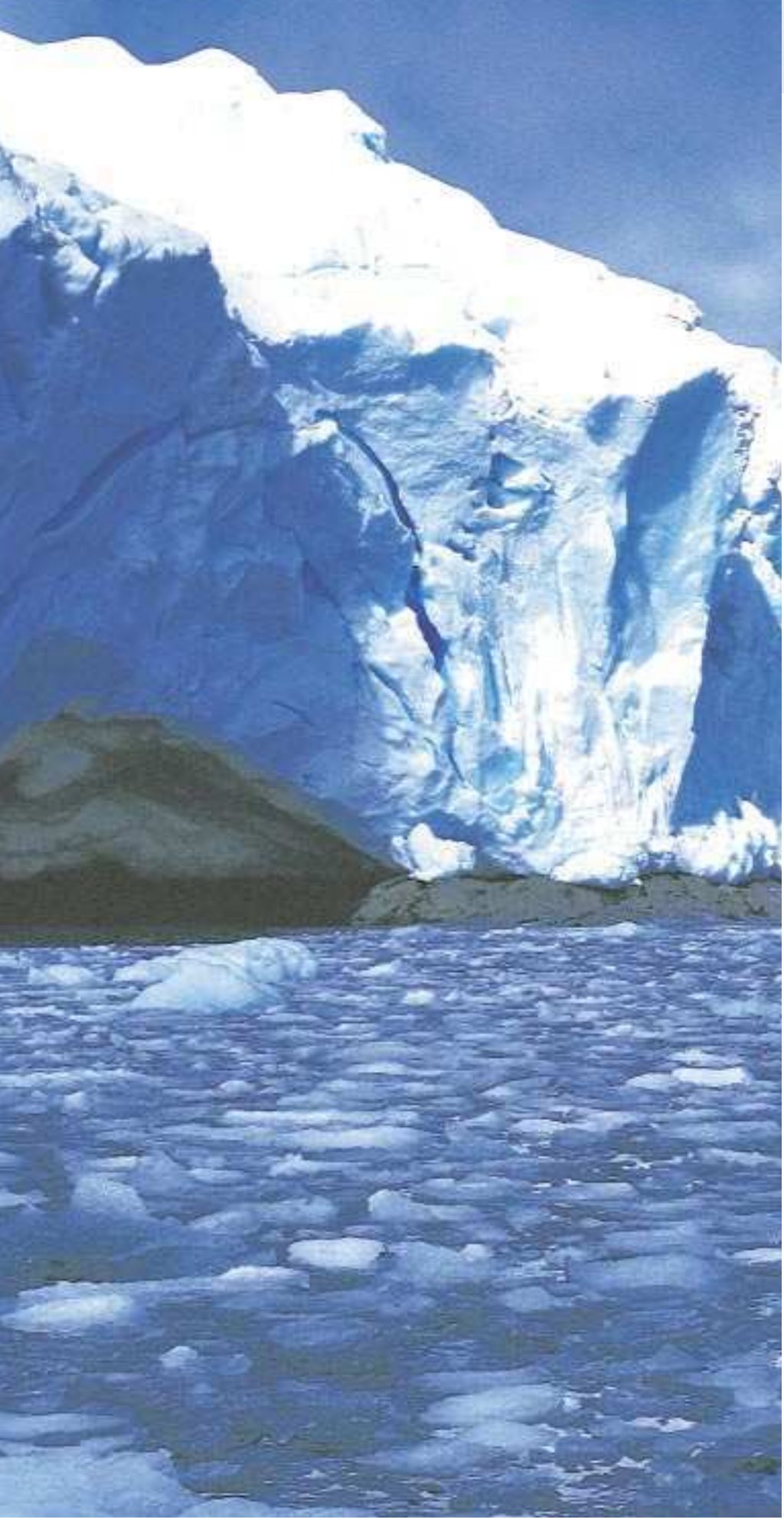
Pierre Ramond ist Physikprofessor und Direktor des Institute for Fundamental Theory der University of Florida in Gainesville. Er hat wichtige Beiträge zur Theorie der Superstrings geleistet.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

Das elegante Universum. Superstrings, verborgene Dimensionen und die Suche nach der Weltformel. Von Brian Greene. Siedler, Berlin 2000.

Neue Welttheorien: von Strings zu Membranen. Von Michael J. Duff in: Spektrum der Wissenschaft 4/1998, S. 62.



GARY BRAASCH

Auf

Von Robert A. Bindschadler
und Charles R. Bentley

Vor 12 000 Jahren, als sich die Erde aus der Erstarrung der letzten Eiszeit löste, überschwemmten riesige Geschwader von Eisbergen den Nordatlantik. Es waren die Trümmer der zerfallenden Eismassen, die halb Nordamerika und Europa bedeckt hatten. Sie verdrängten so viel Wasser, dass der Meeresspiegel weltweit jahrzehntelang um mehr als einen Meter pro Jahr anstieg.

Während der zugefrorene Norden auftaute, blieb das Eis am Südpol im Wesentlichen intakt. Es umfasst heute neunzig Prozent des festen Wassers auf der Erde. Doch in Dutzenden von wissenschaftlichen Untersuchungen der vergangenen dreißig Jahre wurde davor gewarnt, dass der Eispanzer der Westantarktis (desjenigen Teils, der vorwiegend in der westlichen Hemisphäre liegt) nachträglich das gleiche Schicksal erleiden könne wie seine einstigen Gegenstücke im Norden – mit ebenso dramatischen Folgen. In diesem riesigen Eisspeicher sind mehr als drei Millionen Kubikkilometer Süßwasser eingefroren. Würde er komplett abtauen, stiege der Meeresspiegel weltweit um fünf Meter. Zahllose küstennahe Flach-

Von der Eisdecke der Antarktis brechen an den Küsten immer wieder große Stücke ab. Das bedeutet aber nicht, dass sie stark schrumpft oder ausdünnt. Nach neuesten Erkenntnissen wird der Eisverlust durch Schneefall landeinwärts großenteils kompensiert.

dünnem Eis?

Der künftige Anstieg des Meeresspiegels hängt vor allem davon ab, wie schnell die gewaltige Eisdecke der Antarktis schrumpft – eine heiß umstrittene Frage, in der sich endlich ein Konsens abzeichnet.

länder verschwänden in den Fluten, und viele der zwei Milliarden Menschen, die dort leben, wären gezwungen, sich ins Landesinnere zurückzuziehen.

Die meisten Experten sind sich seit langem einig, dass die Eisdecke der Antarktis während der vergangenen Jahrtausende deutlich geschrumpft ist. Damit trug sie zum weiteren Anstieg des Meeresspiegels bei, als die Nordhalbkugel schon weitgehend abgetaut war. Einigkeit herrscht auch darüber, dass der Eispanzer auf der Ostseite des Kontinents relativ stabil ist. Doch im Westen macht ihn ein anderer Untergrund viel mobiler und unberechenbarer. Deshalb stritten sich die Forscher bis vor kurzem darüber, ob die westantarktische Eisdecke in naher Zukunft – in einigen Jahrhunderten oder noch früher – kollabieren wird. Ist ihr Zusammenhalt durch mächtige Eisströme gefährdet, die sich aus dem Inneren des Kontinents in Richtung Ross-See wälzen? Viele Experten – darunter einer von uns (Bindschadler) – befürchteten das. Andere dagegen (darunter Bentley) schlossen aus der Beständigkeit der westantarktischen Eisdecke in der jüngeren Vergangenheit, dass sie nicht so leicht auseinander bricht.

Eine Zeit lang schien es, als würde die Debatte nie entschieden. Ein Mangel an Daten und die praktischen Probleme bei der Erforschung eines Kontinents, der sich die Hälfte des Jahres in frostiges Dunkel hüllt, erschwerten es, zu einer einheitlichen Einschätzung zu gelangen. Obwohl sich der Eisabstrom aus einigen Regionen in jüngster Zeit beschleunigt hat, ist es schwierig zu bestimmen, ob die momentanen Veränderungen in der Dicke oder Fließgeschwindigkeit des Eises nur normale Schwankungen widerspiegeln oder der Beginn eines gefährlichen Trends sind.

Eine Vielzahl von Feld- und Laboruntersuchungen mündete in den letzten Jahren jedoch in einen wachsenden Konsens darüber, welche Faktoren die Zukunft der Westantarktis bestimmen. Experten in beiden Lagern gelangten so zu dem Schluss, dass die Eisströme in Richtung Ross-See – noch – nicht so bedrohlich sind, wie einige von uns befürchtet hatten.

Steigende Temperaturen

Dennoch bleibt das weitere Schicksal der Eisdecke ungewiss. Beispielsweise ist sie – so das überraschende Resultat neuer Untersuchungen – in einem lange wenig beachteten Sektor der Westantarktis dünner geworden. Folglich könnte dort ein zerstörerischer Prozess am Werk sein, der nichts mit Eisströmen zu tun hat. In einer anderen Region – der Halbinsel, die wie ein Arm nach Norden aus der Antarktis herausragt – lagen die Sommertemperaturen in jüngster Zeit deutlich über den langjährigen Mittelwerten. Höchstwahrscheinlich ist dies der Grund für das verstärkte Abbrechen von Schelfeis an den Küsten der Halbinsel, das in den vergangenen Jahren zu beobachten war.

Seit dem Ende der letzten Eiszeit sind die Temperaturen weltweit allmählich angestiegen. Dieser Trend hat sich im 20. ▷

Jahrhundert deutlich beschleunigt – parallel zur zunehmenden Emission von Treibhausgasen, die Wärme in den unteren Luftschichten festhalten. Bislang scheint die Halbinsel der einzige Teil der Antarktis zu sein, an dem diese jüngste klimatische Entwicklung Spuren hinterlassen hat; in anderen Südpolarregionen sind die Durchschnittstemperaturen in den letzten 50 Jahren kaum gestiegen oder sogar leicht gesunken. Die spannende Frage lautet nun, ob die globale Erwärmung sich anschickt, auch den Südrand der Welt weiträumig zu erfassen.

Alarmierende Befunde

Die ersten Befürchtungen über ein mögliches Schwinden der westantarktischen Eisdecke tauchten vor etwa 30 Jahren auf. In einer der einflussreichsten frühen Veröffentlichungen zu dem Thema präsentierte Hans Weertman von der Northwestern University 1974 eine theoretische Analyse der Westantarktis. Grundlage seiner Berechnungen waren die Faktoren, die damals als entscheidend für die Stabilität von Eisdecken galten. Zu jener Zeit wusste man bereits, dass der mächtige Eispanzer der Westantarktis auf einer Landmasse ruht, die großenteils weit unterhalb des Meeresspiegels liegt. Nach seinem Abschmelzen käme eine gebirgige Landschaft zum Vorschein. Täler würden mehr als zwei Kilometer unter den Wasserspiegel abtauchen, Gipfel zwei Kilometer darüber hinausragen. Da die Ränder der Westantarktis so tief hinabreichen, steht das Eis dort in engem Kontakt mit dem umgebenden Meerwasser. Ein großer Teil erstreckt sich sogar – als schwimmendes Schelfeis – über die Meeresoberfläche hinaus. Diese Situation existiert nach Ansicht der meisten Wissenschaftler schon seit 20 000 Jahren.

Weertmans Berechnungen ergaben, dass bei weltweit steigendem Meeresspiegel jedwede Eisdecke, die ein Meeresbecken auffüllt, grundsätzlich instabil ist. Ihre Ränder können durch den Auftrieb der zusätzlichen Wassermassen nämlich nach oben gedrückt oder gar vom Untergrund abgehoben werden. (Im Gegensatz dazu sitzt die Eisdecke der Ostantarktis auf einem Kontinent, der das Meer größtenteils weit überragt und somit fern von seinem zerstörerischen Einfluss ist.) Weertman zog daraus den beunruhigenden Schluss, dass die Eisdecke der Westantarktis auf einen totalen Kollaps zusteuere. Nur eine neue Eiszeit könne ihr dieses Schicksal ersparen.

Falls Weertmans Berechnung zutraf, muss die heutige Eisdecke schon die geschrumpfte Version einer viel größeren Vorgängerin sein. Viele Entdeckungen der damaligen Zeit passten zu dieser Schlussfolgerung. Forscher fanden an nackten Berghängen weit oberhalb der gegenwärtigen Eisoberfläche ungewöhnliche Haufen von Gesteinsschutt, die nur Gletscher hinterlassen haben konnten – ein Hinweis, dass die Eisdecke früher viel mächtiger war. Desgleichen ließen tief eingekerbte ehemalige Gletscherrinnen im Meeresboden vor der Küste vermuten, dass der auf dem Untergrund (Meeresboden) aufsitzende Bereich der Eisdecke einst weiter hinaus in den Ozean reichte. Auf der Basis solcher bruchstückhaften Beobachtungen schätzten einige Forscher, die Eisdecke müsse ursprünglich das Dreifache ihres jetzigen Volumens gehabt haben. Allerdings schrumpfe sie ziemlich langsam, sodass noch 4000 bis 7000 Jahre bis zu ihrem völligen Verschwinden vergehen dürften.

Die Befürchtung, dass die Westantarktis eventuell viel schneller auf einen Kollaps zusteuert, kam erst auf, als die Forscher sich näher mit den Eisströmen zu beschäftigen begannen: natürlichen Förderbändern von vielen hundert Kilometern Länge und mehreren dutzend Kilometern Breite. Anfangs führte man sie zum Teil auf tektonische Kräfte zurück, welche die Westantarktis zerreißen und dabei die Kruste ausdünnen, sodass überdurchschnittlich viel Wärme aus dem Erdinneren entweichen kann. Diese Erwärmung von unten, so die Erklärung, lasse die Basis der Eisdecke schmelzen, wodurch eine Gleitschicht entstünde, die das Eis dazu bringe, relativ rasch sogar die sanftesten Abhänge hinabzurutschen.

Konkrete Belege dafür lieferten Fernerkundungen in den 1970er Jahren. Ihre Besonderheit: Sie benutzten Radarstrahlen, die bis zum Gesteinsboden vordringen. Dabei wurden zwei Strömungssysteme entdeckt, die Eis aus dem Inneren des Kontinents abführen und es in die zwei größten Schelfgebiete der Westantarktis – Ross und Ronne – einspeisen. Sobald es deren meerwärtigen Rand erreicht, löst es sich in Form riesiger Eisberge ab. Dieses dynamische Bild war Anlass für erste Warnungen, die riesigen Gletscher könnten die gesamte Eisdecke in einigen Jahrhunderten oder sogar noch schneller zerstören.

Unberechenbare Eisströme

Angesichts solch alarmierender neuer Erkenntnisse errichteten Teams der Nasa, der Ohio State University in Columbus und der Universität von Wisconsin in Madison 1983 Sommer-Forschungscamps auf Eisströmen oder in deren Nähe. Einige Wissenschaftler untersuchten das Innere der Ströme mit Hilfe von Radarstrahlen und Schallwellen. Andere maßen die Bewegung und Deformation an der Oberfläche. Dabei stellte sich schnell heraus, dass die gewaltigen Flüsse ein glaziologisch halsbrecherisches Tempo an den Tag legen: Mit Fließgeschwindigkeiten von mehreren hundert Metern pro Jahr übertreffen sie normale Gebirgsgletscher um ein Vielfaches.

Einige Feldforscher suchten nach der Ursache dafür, indem sie schmale, kilometertiefe Löcher durch das Eis schmolzen, um Proben aus dem Untergrund zu entnehmen. Das Ergebnis war überraschend: Ein Bodensatz aus zerriebenen Schalen mariner Organismen, vermischt mit Kieseln, Ton und Gesteinsschutt, die sich dort über viele Jahrtausende hinweg abgelagert haben, bildet heute ein Bett aus Schlamm. Dieser ist so weich und glitschig, dass die Eisströme auf ihm noch leichter rutschen als auf der früher vermuteten dünnen Wasserschicht.

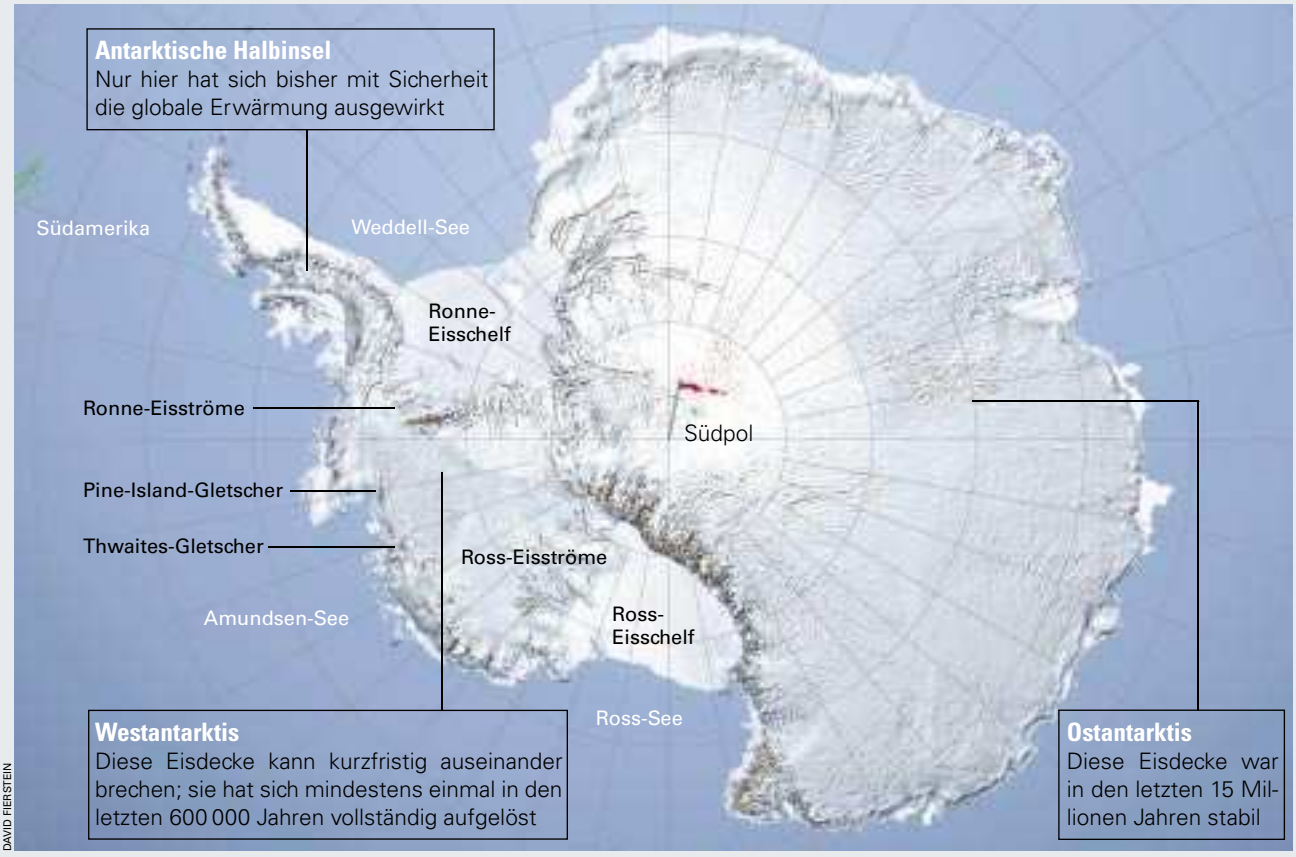
Das war Wasser auf die Mühlen der Katastrophen-Propheten. Beruhigende Kunde kam dagegen von britischen Forschern, welche die Ronne-Eisströme auf der anderen Seite der Westantarktis untersuchten.

IN KÜRZE

- Fast drei Jahrzehnte lang warnten viele Wissenschaftler, die **westantarktische Eisdecke** könne plötzlich auseinander brechen und den Meeresspiegel innerhalb weniger Jahre oder Jahrzehnte um fünf Meter steigen lassen.
- Inzwischen glauben die meisten Experten, dass die Eisdecke viel langsamer schrumpft als ursprünglich befürchtet und dass der **Meeresspiegel** in diesem Jahrhundert wahrscheinlich maximal um einen halben Meter ansteigen wird.
- Dennoch gibt es auch **gegenteilige Befunde**. So scheint der kaum bekannte Amundsen-Sektor der Eisdecke schneller zu schwinden als zuvor angenommen.
- Generell dürfte die **globale Erwärmung**, die sich in der Westantarktis bisher kaum ausgewirkt hat, auch dort künftig einen stärkeren Einfluss ausüben.

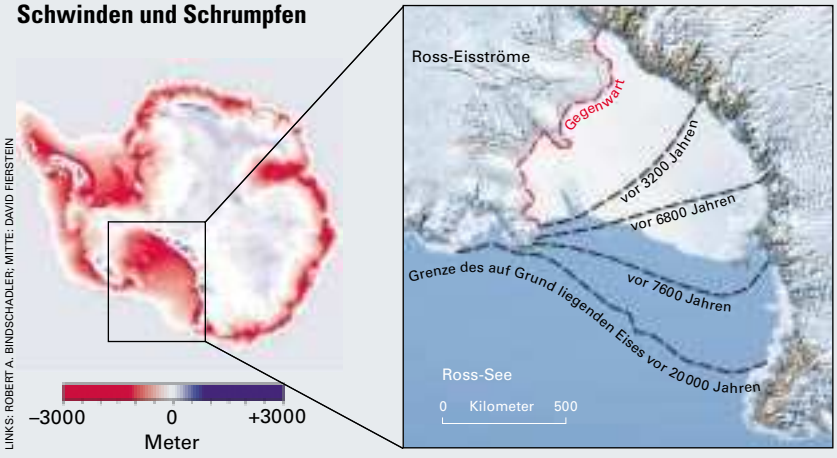
Wächst sich der Trend zur Katastrophe aus?

Die Eisdecke der Antarktis (unten) ist seit dem Höhepunkt der letzten Eiszeit vor 20 000 Jahren deutlich geschrumpft. Der Rückzug war ein langsamer, kontinuierlicher Prozess, der sich nur manchmal kurzfristig beschleunigte. Er betraf vor allem den Westteil des Kontinents, wo die Eisdecke wesentlich labiler ist als auf der Ostseite. Da im Westen in der Vergangenheit gelegentlich rasche Veränderungen auftraten, waren sich die Wissenschaftler nicht sicher, ob die jüngsten dramatischen Eisverluste die normale Schwankung widerspiegeln oder den Beginn eines Besorgnis erregenden Trends hin zu einem katastrophalen Kollaps markieren. In diesem Fall würden die schnell ansteigenden Meere Küstengebiete weltweit überfluten.



DAVID FIERSTEIN

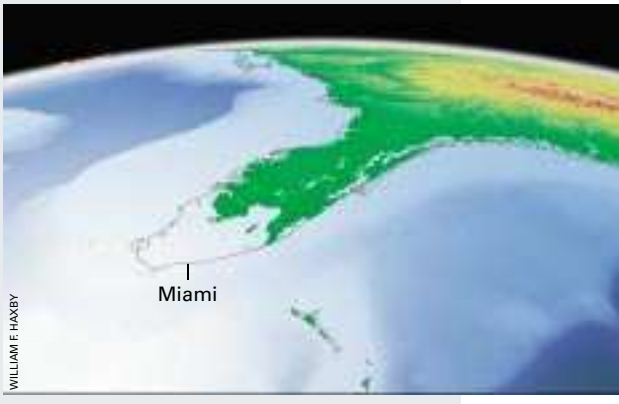
Schwinden und Schrumpfen



LINKS: ROBERT A. BINDSCHADLER; MITTE: DAVID FIERSTEIN

Das Ausdünnen der Eisdecke seit der letzten Eiszeit (rot) entspricht einem Verlust von ungefähr 5,3 Millionen Kubikkilometern. Gelitten hat vor allem die Westantarktis. Die Aufsetzlinie (Grounding Line), an der sich die Eisdecke vom Untergrund ablöst, ist in den vergangenen 7000 Jahren in der Ross-See besonders schnell zurückgewichen (oben rechts) – um rund 700 Kilometer.

Das Katastrophen-Szenario



WILLIAM F. HAXBY

Ein kompletter Kollaps der westantarktischen Eisdecke würde den Meeresspiegel um fünf Meter anheben. Davon betroffen wäre auch Florida. Etwa ein Drittel der Halbinsel würde überflutet.

Eisige Einsichten

Wie die antarktische Eisdecke auf Klimaänderungen reagiert und welche Folgen das für den Meeresspiegel hat, ist nicht immer einfach vorherzusagen. Hier sind einige der weniger offensichtlichen Phänomene, die Wissenschaftler in Betracht ziehen müssen.

Eis muss nicht schmelzen, um den Meeresspiegel steigen zu lassen

Eis, das vom Festland ins Meer gelangt, erhöht den Meeresspiegel, sobald es zu treiben beginnt. Ein Eisberg verdrängt, da er sich zum größten Teil unter der Meeresoberfläche befindet, ein ebenso großes Volumen wie die entsprechende Menge Wasser. Aus diesem Grund lässt abbrechendes Schelfeis, das ja bereits schwimmt, den Meeresspiegel nicht steigen. In der Antarktis sorgen Temperaturen von durchschnittlich etwa –35 Grad Celsius bisher dafür, dass kaum Eis vom Kontinent abschmilzt. Das könnte sich ändern, wenn die globale Erwärmung stärker auf die Region übergreift. Derzeit beeinflusst die Antarktis den Meeresspiegel nur, wenn festes Eis, das durch Gletscher oder Eisströme zur Küste transportiert wird, dort abbricht oder sich bereits vorhandenem Schelfeis anschließt.

DAVID FIERSTEIN

Die tatsächliche Größe eines treibenden Eisbergs ist von oben nicht zu erkennen: Neunzig Prozent seiner Masse sind unter der Oberfläche verborgen.

Eis kann die Folgen der globalen Erwärmung abmildern oder verstärken

Stellen Sie sich ein schneebedecktes Feld in der prallen Sonne vor. Es wirft viel mehr Sonnenstrahlung in den Weltraum zurück als nackte Erde oder offenes Wasser. Durch diese Reflexion bleibt die Luft über Schnee- oder Eisflächen kalt. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit weiterer Schneefälle. Würde sich die Atmosphäre auf Grund der globalen Erwärmung jedoch so stark aufheizen, dass das Eis zu schmelzen beginnt, käme ein größerer Teil der dunklen Oberfläche darunter zu Tage. Dann würde die Region mehr Sonnenenergie absorbieren und die Luft sich noch stärker erwärmen.

Die globale Erwärmung kann den Anstieg des Meeresspiegels bremsen oder beschleunigen

Wärmere Luft verstärkt die Verdunstung aus den Ozeanen. Zudem nimmt sie mehr Feuchtigkeit auf als kältere. Bei einer globalen Erwärmung kann also mehr verdunstetes Meerwasser aus gemäßigten Breiten in die Polargebiete gelangen, wo es auskondensiert und als Schnee fällt. Dieser Prozess würde noch verstärkt, falls die globale Erwärmung beträchtliche Mengen an Treibeis zum Schmelzen brächte, sodass ein größerer Teil der Meeresoberfläche frei läge und der Verdunstung ausgesetzt wäre. Theoretisch könnte sich dann mehr Meerwasser in Schnee und Eis verwandeln, als durch Abfluss von Süßwasser oder in Form von Eisbergen ins Meer zurückkehrt. Der Anstieg des Meeresspiegels würde so gebremst. Der Haken dabei ist, dass die globale Erwärmung auch das Abschmelzen und Aufbrechen von Inlandeis beschleunigen kann. Die Auswirkung der globalen Erwärmung auf die Eisdecken hängt also davon ab, welcher Prozess überwiegt.

▷ Sie versicherten der Weltöffentlichkeit, dass die Lage in ihrem Sektor bei weitem nicht so dramatisch sei. Doch die Glaziologen in den Camps am Ross-Schelf konterten, der Rest der westantarktischen sowie ein Teil der ostantarktischen Eisdecke würden zwangsläufig folgen, wenn erst einmal die Million Kubikkilometer Eis der Ross-Region verschwunden sei.

In den 1990er Jahren kam eine weitere potenziell beunruhigende Eigenheit der Ross-Eisströme ans Licht: Sie sind nicht nur schnell, sondern auch sprunghaft. Radaruntersuchungen der Struktur ihres Untergrunds ergaben, dass sie sich nicht immer in ihrer heutigen Lage befanden. Auf Satellitenbildern des Ross-Schelfs, in dem sich der Eisabfluss der letzten tausend Jahre gesammelt hat, zeigten sich außerdem Spalten und andere Strukturen, die dramatische Schwankungen der Fließgeschwindigkeit in der Vergangenheit dokumentieren. Tatsächlich scheint ein Strom, der schlicht unter dem Namen »C« bekannt ist, vor etwa 150 Jahren plötzlich gestoppt zu haben. Desgleichen ist der Whillans-Eisstrom in den vergangenen Jahrhunderten immer langsamer geworden. Falls die Ströme kommen und gehen, wie diese Befunde andeuten, wäre ihre Entwicklung und damit der künftige Eisabfluss schwer einzuschätzen. Besonders alarmierend schien die Gefahr, dass sich die stagnierenden Ströme unversehens wieder in Bewegung setzen.

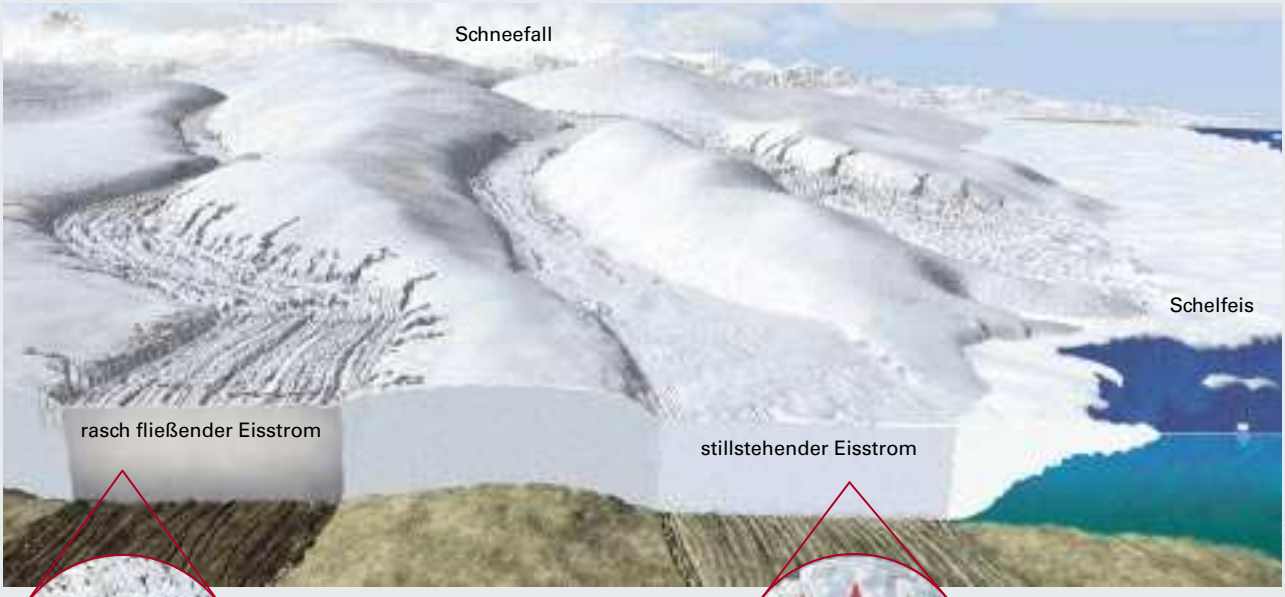
Doch schon bald sollte es – zumindest für die nahe Zukunft – Entwarnung geben.

Vor etwa fünf Jahren begann eine Flut von Berichten überzeugende Hinweise darauf zu liefern, dass die Eisdecke nicht so stark geschrumpft ist wie zuvor geschätzt. Im Jahr 2000 untersuchte Eric J. Steig an der Universität von Washington in Seattle einen alten Eis-Bohrkern, den man 1968 im Zentrum der Westantarktis entnommen hatte, mit neuen Methoden noch einmal. Die ursprüngliche Analyse hatte darauf hingedeutet, dass die Eisdecke während der letzten Eiszeit 950 Meter dicker war. Doch Steig kam bei seiner verbesserten Auswertung nur noch auf eine Differenz von 200 Metern.

In den Bergen der Executive Committee Range rekonstruierte John O. Stone, ebenfalls an der Universität von Washington, das Schrumpfen der Eisdecke, indem er die radioaktiven Reaktionsprodukte der kosmischen Strahlung im Gestein bestimmte. Diese sind von dem Moment an, als das zurückweichende Eis nackten Fels hinterließ, mit bekannter Geschwindigkeit zerfal-

Wann die Eisdecke rutscht oder stockt

Gewaltige Eisströme wälzen sich mit Geschwindigkeiten von einigen hundert Metern pro Jahr zu den Küsten der Westantarktis und befördern dabei jährlich mehr als 400 Kubikkilometer Eis ins Meer. Bei diesem Tempo könnten sie die westantarktische Eisdecke in maximal 7000 Jahren vollständig abtragen. Doch zum einen liefert der Schneefall ständig Eis nach, und zum anderen geraten einzelne Ströme immer wieder für längere Zeit ins Stocken. Ob sie stillstehen oder sich bewegen, hängt davon ab, wie viel flüssiges Wasser an ihrer Basis als Gleitmittel vorhanden ist.



Die Eisströme kommen in Bewegung, wenn ihr lehmiger Untergrund feucht wird. Unter einem dicken Eispanzer staut sich die aus der Tiefe aufsteigende Erdwärme und schmilzt dessen Basis an. Das Schmelzwasser weicht die Lehmschicht auf, sodass sie unter dem Gewicht des auflastenden Eises extrem glitschig wird.

Eisströme stoppen plötzlich, wenn ihr Untergrund aushärtet. Beim raschen Abfließen wird das Eis nämlich immer dünner. Dadurch hält es die Erdwärme weniger wirksam zurück, während die Kälte der Luft besser bis zur Basis vordringen kann. Das Wasser im Untergrund gefriert. Der Lehm wird folglich steif und verliert seine Gleitfähigkeit.

len. Stones Beobachtungen setzten dem ursprünglichen Umfang der Eisdecke enge Grenzen. Demnach kann sie höchstens zweieinhalbmal so dick gewesen sein wie heute.

Anfang 2001 vermochten die Vertreter beider Lager noch ihre jeweiligen Ansichten mit handfesten Fakten zu untermauern. Doch führte kein Weg daran vorbei, wenigstens den Versuch zu machen, die widersprüchlichen Befunde in Einklang zu bringen. Das zwang letztlich alle dazu, anzuerkennen, dass zwar große kurzfristige Schwankungen auftreten, die Änderungen auf lange Sicht aber insgesamt weniger bedeutend sind.

Seither haben verbesserte Messungen der Bewegung der Ross-Eisströme bestätigt, dass sich Eisverlust und neuer Schneefall in diesem Sektor im Großen und Ganzen die Waage halten. Und so konnten sich Ende 2001 die meisten Antarktisforscher – uns beide eingeschlossen – darauf einigen, dass die Ross-Ströme momentan keinen Eisschwund verursachen. Schwankungen in der Relation zwischen Schneefall und Eisabfluss scheinen sich im vergangenen Jahrtausend ausgeglichen zu haben – ein Zeichen dafür, dass von der Eisdecke eine geringere Gefahr für den Meeresspiegel ausgeht als vielfach befürchtet.

Hinweis auf regionalen Kollaps

Doch die Teilnehmer an dieser Debatte kennen die Dynamik der Eisströme zu gut, um zu wissen, dass ihre Entwarnung nur für die unmittelbare Gegenwart zutrifft. Zur Vorsicht mahnt etwa der Blick in die weitere Vergangenheit. So lassen geologische Befunde nahe der U.S. McMordo Station darauf schließen, dass sich die Eisdecke in diesem Gebiet vor rund 7000 Jahren sehr rasch zurückzog. Ein solcher zeitlich begrenzter, regionaler Zusammenbruch könnte öfter aufgetreten sein und ist auch heute nicht auszuschließen.

Um die künftige Stabilität der Eisdecke besser beurteilen zu können, haben sich die Forscher auch um ein besseres Verständnis der Faktoren bemüht, die das Verhalten der Eisströme beeinflussen. Dadurch können sie heute beispielsweise erklären, warum die Bewegung gelegentlich stoppt und wieder einsetzt (siehe Kasten oben). Offenbar bestimmen Wasser und Sediment am Meeresgrund das kurzfristige Geschehen innerhalb von Tagen oder Jahren. Über Zeiträume von Jahrtausenden hinweg spielen dagegen die weltweiten Klimabedingungen, insbesondere die Lufttemperatur und der Meeresspiegel, die entscheidende Rolle. Derlei Ein- ▷

▷ sichten werden helfen, Computermodelle zu entwerfen, die das kurzfristige Verhalten der Ströme zuverlässiger vorhersagen.

Auch wenn der westantarktische Eisschild nicht so bald auseinander zu brechen droht, hat sich in den vergangenen Jahren gezeigt, dass nicht für alle seine Abschnitte Entwarnung gegeben werden kann. Während sich Feldforscher intensiv mit den Eisströmen beschäftigten, die das Ross- und Ronne-Schelfeis nähren, sammelten verschiedene Satellitensensoren emsig Daten von einem anderen Areal: der kaum erforschten Region, die an die Amundsen-See grenzt. Amerikanische und britische Forschergruppen entdeckten bei der Auswertung der Millionen von Messwerten aus den 1980er und 1990er Jahren über die Höhe des Eises, dass es hier sogar noch schneller schwindet als ursprünglich für die Ross-Eisströme angenommen.

Unvermutete Schwachstelle

Duncan Wingham vom University College London und H. Jay Zwally vom Goddard-Raumflugzentrum der Nasa fanden unabhängig voneinander heraus, dass jene Teile der Eisdecke, die den Pine-Island- und die Thwaites-Gletscher nähren, rasant ausdünnen – im letzteren Fall um mehr als zehn Zentimeter pro Jahr. Dazu passen die Ergebnisse neuerer Messungen mittels Radar-Interferometrie – einer Methode, die noch Verlagerungen des Eises um wenige Millimeter sichtbar macht. Mit ihrer Hilfe entdeckte Eric Rignot vom Jet Propulsion Laboratory in Pasadena (Kalifornien), dass sich beide Gletscher immer schneller Richtung Amundsen-See bewegen und zum Inneren des Kontinents hin schrumpfen. Dadurch erhöhen sie den Meeresspiegel um 0,1 bis 0,2 Millimeter pro Jahr, was immerhin fast zehn Prozent des gesamten Anstiegs ausmacht. Demnach würden sie innerhalb von 7500 bis 15 000 Jahren dreißig Prozent der gesamten Eisdecke abführen – oder noch viel schneller, wenn ein katastrophaler Kollaps aufträte, wie man ihn früher für den Ross-Sektor befürchtete.

Das alles ist für Terence J. Hughes an der Universität von Maine in Orono keine Überraschung. Vor langer Zeit schon bezeichnete er den Amundsen-Sektor als wunden Punkt der westantarktischen Eisdecke. Doch Feldbeobachtungen in dieser entlegenen Region sind jahrzehntelang an logistischen Problemen gescheitert. Es gibt keine permanente Forschungsstation in der Nähe, und die Gegend zählt zu den wolkenreichsten der Erde. Außerdem weisen die Gletscher der Amundsen-See einige Besonderheiten auf, die in Frage stellen, ob sich die mühselig gewonnenen Erkenntnisse aus dem Ross-Sektor auf sie anwenden lassen. So fallen sie ungewöhnlich steil zur Küste hin ab. Und weil sie direkt ins Meer kalben, anstatt einen Schelfeis-Gürtel zu speisen, meinen einige Wissenschaftler, dass in dieser Region der Zerfallsprozess der Eisdecke schon weiter fortgeschritten sein könnte als anderswo in der Antarktis.

Die Ungewissheit über das Verhalten des Sektors rund um die Amundsen-See ist nur eine von mehreren ungelösten Fragen. So könnte sich der allgemeine Erwärmungstrend von der Antarktischen Halbinsel, wo die Atmosphäre im Sommer schon zwei Grad wärmer ist als in den 1950er Jahren, langsam in Richtung Südpol fortpflanzen. Selbst geringfügige Änderungen der Lufttemperatur bergen aber die Gefahr, dass sich das heute noch relativ stabile Schelfeis auflöst. Wärmere Meeresströmungen aus niedrigeren Breiten scheinen es nach Berichten vom letzten Jahr bereits von unten abzuschmelzen, sodass sich die Linie, an der es auf dem Untergrund aufsitzt, schneller als erwartet zurückverlagert. Jüngste Befunde deuten auch darauf hin, dass das Eis in der Amundsen-See schwindet.

Zum Glück für uns heutige Erdbewohner gibt es in der westantarktischen Eisdecke offenbar mehr stabilisierende Rückkopplungen als in ihren ehemaligen Gegenstücken in Nordamerika und Europa. Während das arktische Inlandeis beim Anstieg der Temperatur um wenige Grad Celsius schlagartig auseinander brach, blieb das antarktische großenteils erhalten. Das frühe Modell von Weertman scheint demnach zu stark vereinfacht zu sein. Mit ihrer Eigendynamik, die beispielsweise rasch fließende Eisströme stoppen und jahrhundertelang stagnieren lässt, hat die westantarktische Eisdecke bislang genügend Kontrolle über ihre Größe ausgeübt, um einen Zerfall zu vermeiden oder zumindest aufzuhalten.

Sie wird – so unsere vorsichtige Prognose auf der Grundlage der bisherigen Erkenntnisse – zwar weiter schrumpfen, aber nur sehr langsam über einen Zeitraum von Jahrtausenden hinweg. Dabei dürfte sich ihr durchschnittlicher Beitrag zum Anstieg des Meeresspiegels etwa verdoppeln: von bisher zwei auf vier Millimeter pro Jahr – oder einen Meter alle 500 Jahre. Seufzer der Erleichterung sind dennoch nicht angebracht. Schließlich hat dieser bemerkenswerte Eispanzer die Forscher über dreißig Jahre lang genarrt und ist daher immer für Überraschungen gut. ◁

Robert A. Bindschadler hat als Wissenschaftler am Goddard-Raumflugzentrum der Nasa in 23 Jahren zwölf Expeditionen zur westantarktischen Eisdecke geleitet. Zu seinen Pionierleistungen zählt die Entwicklung einer Reihe von Fernerkundungsmethoden für glaziologische Untersuchungen. **Charles R. Bentley** besuchte die Westantarktis erstmals während des Internationalen Geophysikalischen Jahrs 1957/58. Bei diesem Aufenthalt, der 25 Monate dauerte, leitete er verschiedene Erkundungsexpeditionen in unbekannte Teile der Eisdecke. Als Geophysik-Professor an der Universität von Wisconsin in Madison kehrte er bis zu seiner Pensionierung im Jahre 1998 immer wieder in die Antarktis zurück.

Literaturhinweise

The West Antarctic Ice Sheet: Behavior and Environment. Von Richard B. Alley und Robert A. Bindschadler (Hg.). Antarctic Research Series, Bd. 77. American Geophysical Union, 2001.

Future of the West Antarctic Ice Sheet. Von Robert A. Bindschadler in: Science, Bd. 282, S. 428, 16.10.1998.

Rapid Sea-Level Rise Soon From West Antarctic Ice-Sheet Collapse? Von Charles R. Bentley in: Science, Bd. 275, S. 1077, 21.2.1997.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Planeten als Einzelgänger

Nicht alle Planeten kreisen um einen zentralen Stern. Manche schwirren fern von ihren Sonnen frei durch den Raum. Insbesondere in Kugelsternhaufen dürfte es zahlreiche Planeten-Waisen geben.

Von Jarrod R. Hurley und Michael M. Shara

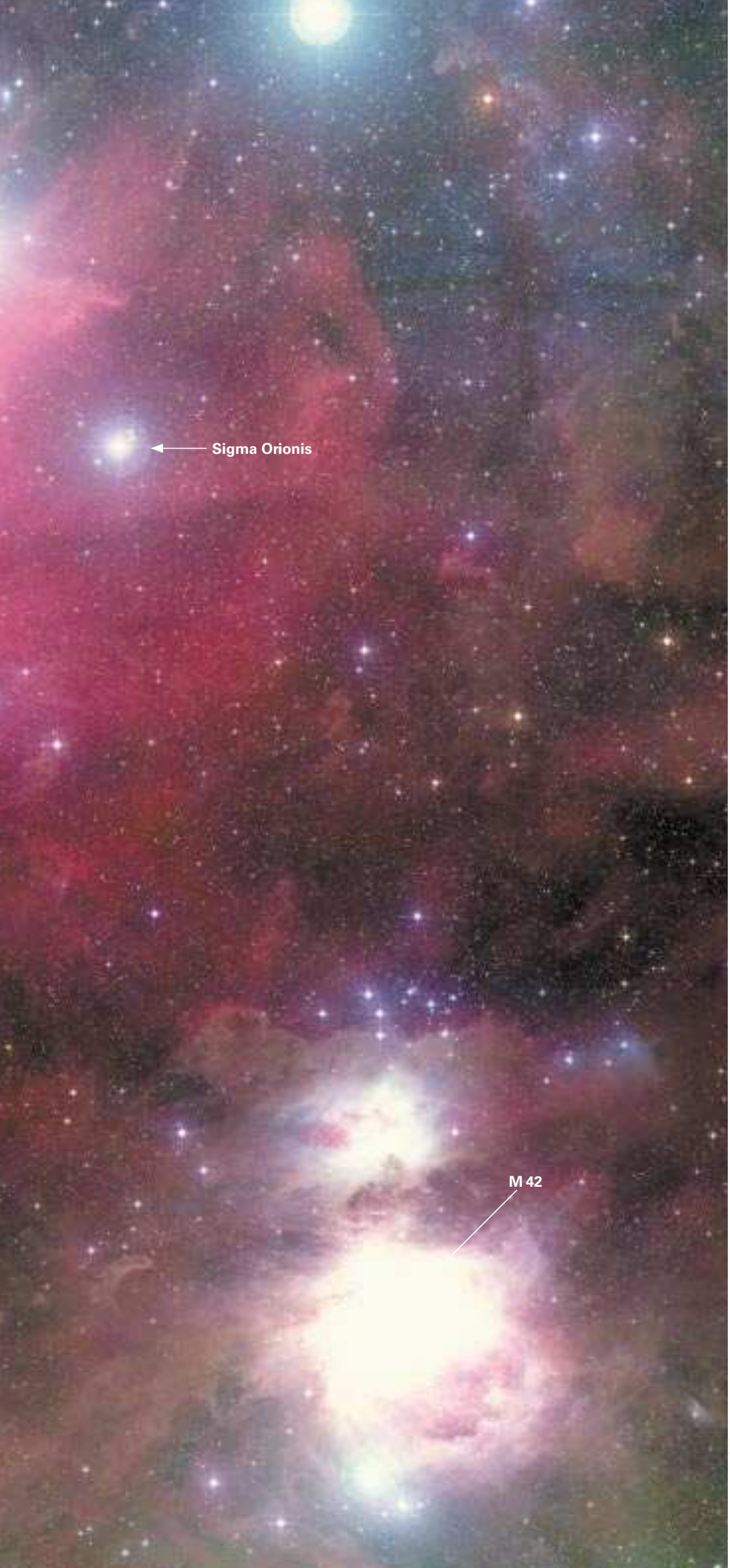
Die Frage, ob es außerhalb des Sonnensystems Planeten gebe, war jahrhundertelang brisant. So musste der Philosoph Giordano Bruno unter anderem deshalb im Jahr 1600 sein Leben auf dem Scheiterhaufen lassen, weil er behauptet hatte, im Weltall gebe es unendlich viele andere Welten. Heute wird ein Wissenschaftler nicht mehr öffentlich verbrannt, wenn er über extrasolare Planeten spricht, doch das Arbeitsgebiet ist noch immer von Kontroversen geprägt. Die Astronomen kennen mittlerweile hundert Planeten auf Bahnen um andere Sterne. Das ist an sich schon eine aufregende Erweiterung unseres Weltbildes. Noch faszinierender ist allerdings die Entdeckung, dass einige dutzend extrasolare Planeten überhaupt nicht an einen Stern gebunden sind. Diese Himmelskörper treiben also frei durchs All, ohne einen Zentralstern zu umrunden. Damit gehören sie zu den am heftigsten diskutierten Objekten, die bisher bei der Suche nach anderen Welten gefunden wurden.

Das Problem dabei ist, dass sich die Astronomen bis heute nicht einig sind, was denn eigentlich unter einem Planeten zu verstehen sei. Die meisten der neu entdeckten Trabanten fremder Sterne sind größer als Jupiter, der größte Riesenplanet in unserem eigenen Sonnensystem. Manche von ihnen haben mehr als die zehnfache Masse des Jupiters. Das reicht schon nahe an die Untergrenze eines anderen Typs substellarer Himmelskörper heran, der so genannten Braunen Zwerge. Dies sind gewissermaßen missratene Sterne: Ihre Masse ist zu klein und die Dichte in ihrem Inneren zu gering, als dass dort Wasserstoff zu Helium verschmelzen könnte. Die Massen von Braunen Zwergen liegen zwischen denen von Planeten und wahren Sternen, doch eine genaue Abgrenzung dieser verschiedenen Himmelskörper-Typen ist noch etwas unklar. Verwirrenderweise gibt es sogar Hinweise darauf, dass Braune Zwerge selbst Planeten haben können.

Andererseits sind einige der frei treibenden Planeten kaum größer als der Jupiter. Doch ihr bloßes Vorhandensein stellt die traditionelle Vorstellung von Planeten in Frage, der zufolge es substellare Himmelskörper sind, die seit ihrer Entstehung einen Zentralstern umkreisen. Viele Astronomen sträuben sich deshalb, diese Himmelskörper planetarer Größe als »Planeten« zu bezeichnen; manche sprechen einfach von *free-floaters*, also von »frei Treibenden«.

Bislang ist völlig unklar, wie die frei treibenden Planeten entstanden sein könnten. Wenn sie sich wie Sterne durch den Gravitationskollaps einer Staub- und Gaswolke gebildet haben, dann sollte eine gewisse Anzahl von ihnen gemeinsam mit den Sternen in jungen Sternhaufen oder -assoziationen entstanden sein. Wenn sich

Das Sternbild Orion enthält ausgedehnte Molekülwolken, in denen Tausende von Sternen entstehen. Im Orion-Nebel (M 42) und nahe dem hellen Stern Sigma Orionis haben Astronomen auch rund vierzig planetengroße Objekte gefunden, die ohne einen Zentralstern frei durch den Raum treiben.



AAO-ROE / DAVID MALIN

die Free-Floater aber in der protoplanetaren Scheibe um einen entstehenden Stern herausbildeten, dann stellt sich die Frage, warum der verwaiste Planet nun von seinem Zentralgestirn getrennt ist.

Unsere Forschung befasst sich mit der zweiten Möglichkeit. Wir spezialisieren uns auf Kugelsternhaufen und untersuchen ihren Zustand und ihre Entwicklung, mit direkten Beobachtungen ebenso wie mit Computersimulationen. Das scheint zunächst wenig mit dem Studium extrasolarer Planeten zu tun zu haben. Doch stellt sich heraus, dass dichte Sternhaufen wegen der dynamischen Wechselwirkungen zwischen den darin befindlichen Sternen ein fruchtbares Feld für die Suche nach diesen Himmelskörpern sein können. Hier beschreiben wir die aktuellen Entdeckungen frei treibender Planeten und zeigen, dass sie vielleicht eigentlich gar nicht so überraschend sind – auf die Gefahr hin, damit eine neue Kontroverse zu entzünden.

Neue Klasse von Himmelskörpern

Die frei treibenden Planeten sind nicht nur deswegen interessant und wichtig, weil sie eine neue Klasse von Himmelskörpern darstellen. Die Anzahl und die Typen der Körper in unserem Milchstraßensystem, die kleiner sind als ein Stern und damit weniger als 0,08 Sonnen- beziehungsweise 80 Jupitermassen haben, ist praktisch unbekannt. Man darf mehrere Größenabstufungen erwarten, von Braunen Zwergen und riesigen Gasplaneten über Gesteinsplaneten wie unsere Erde bis hin zu kleineren Körpern wie den Monden und Asteroiden in unserem Sonnensystem.

Glaubhafte Zahlen über die Häufigkeiten solcher Körper sind nicht nur für die Suche nach bewohnbaren Welten und außerirdischem Leben von Interesse: Auch fundamentale Fragen der Astrophysik und Kosmologie sind betroffen, wie die relative Zahl und Größe neu entstandener Sterne in einem Haufen (die anfängliche Massenfunktion oder *initial-mass function*) und die Natur der gewöhnlichen (baryonischen) Dunklen Materie im Universum.

Motiviert von solchen Fragen haben mehrere Astronomenteams Anfang der 1990er Jahre eine himmlische Jagd auf andere Welten begonnen. Das hat immer wieder zu neuen überraschenden Entdeckungen geführt, angefangen 1991 mit dem Fund des ersten extrasolaren Planeten überhaupt. Allerdings umkreist dieser einen besonders exotischen Stern: einen Pulsar, einen schnell rotierenden Neutronen- ▷

▷ stern also, der intensive Radiowellen aussendet. Niemand hatte erwartet, dass Pulsare Planeten haben können, weil die Supernova-Explosion, aus der Neutronensterne hervorgehen, alle umgebenden Planeten zerstört haben sollte.

Die ersten extrasolaren Planeten, die gewöhnliche Sterne umkreisen, wurden schließlich 1995 gefunden. Aber auch diese Systeme erwiesen sich als sonderbar. Unter den zuerst entdeckten Trabanten sind einige von Jupitergröße, die ihren Zentralstern auf sehr engen Bahnen in weniger als fünf Tagen Umlaufzeit umkreisen. Das passte überhaupt nicht zu den damals gängigen Modellen für die Bildung von Planetensystemen, denen zufolge solche Gasgiganten nur in viel größeren Abständen und mit Umlaufperioden von etwa zwölf Jahren – wie unser Jupiter – um ihr jeweiliges Zentralgestirn kreisen sollten. In den letzten Jahren sind allerdings auch immer mehr »normale« Planetensysteme entdeckt worden.

Angesichts der Überraschungen, welche die fremden Planetensysteme schon erbracht haben, würde es nicht verwundern, wenn auch die frei treibenden Planeten für einiges Durcheinander sorgen sollten. Verglichen mit dem heutigen Rummel war die Entdeckung der ersten Exemplare 1998 praktisch ohne Aufhebens berichtet worden. Tief versteckt in einem Artikel über junge Braune Zwerge hatten die Autoren um Motohide Tamura vom Nationalen Astronomischen Observatorium Japans angemerkt, dass einige der von ihnen beobachteten Objekte weniger als 13 Jupitermassen hatten. Damit waren diese Himmelskörper gar keine Braunen Zwerge, sondern eher Riesenplaneten. 13 Jupitermassen entspricht der Grenze, ab der in einem Himmelskörper Fusionsreaktionen von Deuterium (schwerem Wasserstoff) ablaufen können, was meist als Untergrenze für den Bereich der Braunen Zwerge gilt. Weil die japanischen Astronomen so bescheiden waren, blieb ihre Entdeckung lange unbeachtet.

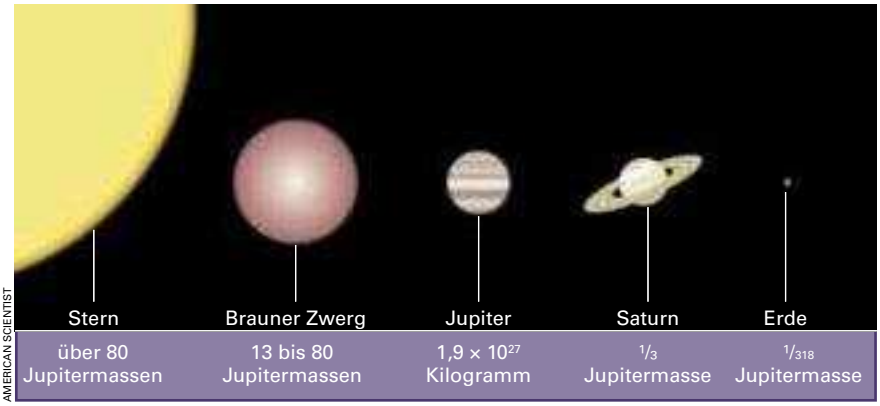
AAO / DAVID MALIN

Frei treibende Planeten, Sub-Braune Zwerge oder Planetare?

Tamuras Gruppe hatte diese planetengroßen Körper in dem Sternentstehungsgebiet Chamaeleon I gefunden, in dem sie nach jungen Sternen suchte. Im Rückblick überrascht es nicht, dass die ersten Free-Floater gerade dort gefunden wurden. Da junge Planeten noch etwas von der Wärme zurückbehalten haben, die während ihrer Bildung durch Zusammenballen von Materie entsteht, offenbart sich ihre Infrarotstrahlung denselben Detektoren, mit denen Astronomen nach Braunen Zwergen und sehr jungen Sternen fahnden.

Ähnliche Forschungsprojekte führten schließlich zu weiteren Entdeckungen. Im Frühjahr 2000 identifizierten zwei Briten, Philip Lucas von der Universität von Hertfordshire und Patrick Roche von der Universität Oxford, mehrere Kandidaten für Free-Floater inmitten des Orion-Nebels, eines 1500 Lichtjahre von der Erde entfernten Sternentstehungsgebiets. Einige dieser Objekte schienen weniger als 13 Jupitermassen zu haben. Wie auch bei Tamuras Arbeit hängt die Natur dieser Himmelskörper teilweise von ihrem Alter ab. Wenn sie sehr jung sind, vielleicht nur eine Million

Der Kugelsternhaufen 47 Tucanae enthält mehrere Millionen Sterne und eine unbekannte Anzahl von Planeten. Können Planetensysteme in dem Schwerkraftchaos einer Umwelt mit 3000 Sternen pro Kubiklichtjahr überhaupt stabil sein? Das versuchen Astronomen zu klären, indem sie das dynamische Verhalten mit Computern simulieren.



AMERICAN SCIENTIST

Was eigentlich ist ein Planet? Die Definition hängt teilweise von der Masse des Himmelskörpers ab. Oberhalb von 13 Jupitermassen ist das Objekt als Brauner Zwerg anzusehen. Die kleinsten freien Planeten, die bisher entdeckt wurden, haben rund das Fünffache der Jupitermasse.

Jahre alt, dann entspricht ihre Leuchtkraft Objekten von planetaren Ausmaßen.

Einige Astronomen stellten die Entdeckungen von Lucas und Roche sogleich in Frage: Vielleicht strahlen diese Objekte in Wirklichkeit viel heller, und sie stehen hinter dem Orion-Nebel, dessen Staub ihr Licht dämpft und die Planetennatur vortäuscht? Dann wären es in Wahrheit Braune Zwerge. Andere sprachen sich prinzipiell gegen die Bezeichnung »Planeten« für solche Objekte aus. Alan Boss von der Carnegie-Institution in Washington hält nicht die Masse, sondern den Entstehungsmechanismus für entscheidend: Nur was sich in einer protoplanetaren Scheibe um einen jungen Stern gebildet habe, sei Planet zu nennen. Boss hat einen Mechanismus vorgeschlagen, bei dem sich Objekte von Planetengröße auf praktisch dieselbe Weise bilden wie Sterne: Das seien dann keine Planeten, sondern »Sub-Braune Zwerge«.

Kurz nach den Entdeckungen von Lucas und Roche meldete eine zweite Gruppe von Astronomen Free-Floater in einem anderen Teil des Sternbilds Orion. Maria Rosa Zapatero Osorio, damals am Astrophysikalischen Institut der Kanaren auf Teneriffa, und ihre Koautoren aus Spanien, Deutschland und den USA hatten 18 lichtschwache Vertreter dieser Objektklasse nahe des Sterns Sigma Orionis entdeckt. Die betreffende Region ist tausend Lichtjahre von der Erde entfernt und enthält ein Nest von Sternen, die nur etwa ein bis fünf Millionen Jahre alt sind. Unter diesen jungen Sternen findet sich eine Anzahl von Objekten, deren Oberflächentemperatur nur 1700 bis 2200 Kelvin beträgt. (Zum Vergleich: Die Oberfläche unserer Sonne ist mit 5800 Kelvin viel heißer.) Aus ihrem geringen Alter und der niedrigen Temperatur berechneten die Astronomen Massen vom nur 5- bis 15fachen der des Jupiters. Zurückhaltend sprachen sie in ihrer Veröffentlichung von »jungen, isolierten Objekten mit planetarer Masse«. Im Frühjahr 2002 sollte sich dann herausstellen, dass eines dieser Objekte, S Orionis 70, sogar nur das Dreifache der Jupitermasse zu haben scheint.

Inzwischen hatte die Gruppe um Lucas und Roche im Herbst 2001 weitere Indizien vorgelegt, wonach ihre Funde tatsächlich im Orion-Nebel liegen und darum nur planetengroß sein können. Ihre spektroskopischen Untersuchungen der Free-Floater zeigen die Anwesenheit von Wasser, was auf ein geringes Alter von etwa einer Million Jahre und auf eine geringe Masse hinweist. Jetzt sprechen die Entdecker von 15 Free-Floatern mit Planeten-Massen – und benutzen gleich noch einen neuen Ausdruck für planetengroße Objekte, die nicht um einen Stern kreisen: Planetare.

In allen diesen Forschungsprojekten wurden die frei treibenden Planeten innerhalb von Gruppen neugeborener Sterne gefunden. Die Mitglieder solcher Gruppen verteilen sich im Laufe der Zeit im Raum – entweder, weil sie nur in losen Assoziationen versammelt und deshalb nie gravitativ aneinander gebunden waren, oder weil sie sich in kleinen, offenen Sternhaufen befinden, die über die Jahrmilliarden hinweg von galaktischen Gezeitenkräften aufgerieben werden. Als so genannte Feldsterne wandern sie schließlich – einzeln oder auch mit einigen wenigen Partnern als Mehrfachsystem – einsam durch die Galaxis, genau wie unsere Sonne. Alle planetengroßen Free-Floater, die innerhalb offener Haufen ▷

JARROD R. HURLEY, MICHAEL M. SHARA

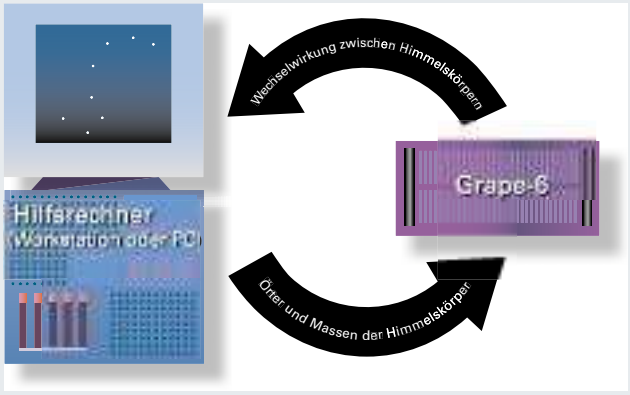
Der Computer Grape-6 (Gravity Pipe) wurde speziell für die Modellierung dynamischer Wechselwirkungen in Sternhaufen entwickelt. Ein Teil der Rechenalgorithmen ist fest verdrahtet. Dieser Prototyp hat eine Rechenleistung von 0,5 Teraflops (0,5 Billionen Gleitkomma-Operationen pro Sekunde) und wurde für die hier beschriebenen Arbeiten benutzt.

Wie ein Kugelsternhaufen simuliert wird

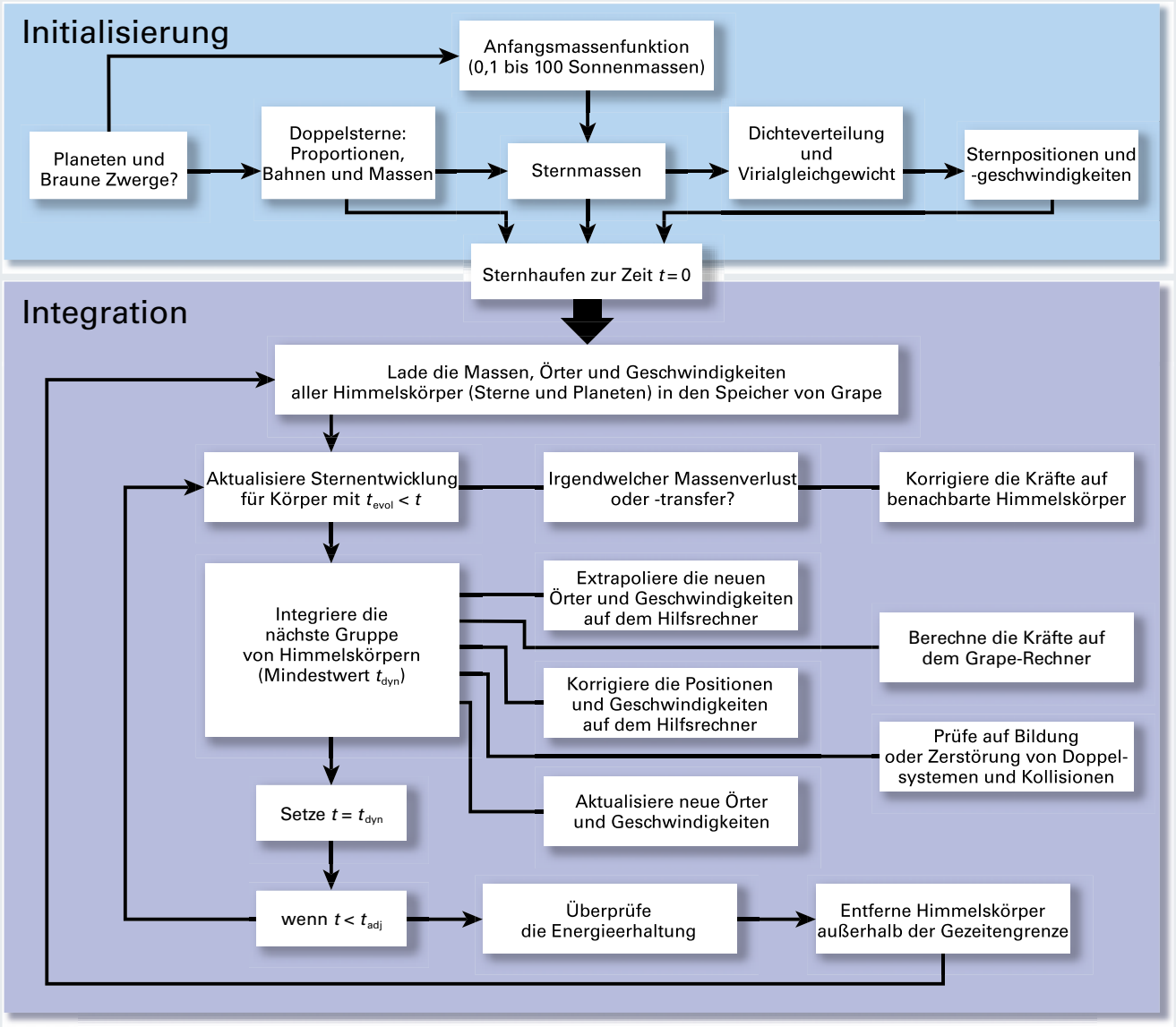
An der N-Körper-Simulation eines Kugelsternhaufens sind zwei Computer beteiligt: Ein Hilfsrechner speichert Örter und Massen der Himmelskörper; Grape-6, ein Spezialcomputer, berechnet die Wechselwirkungen zwischen ihnen. Zunächst werden Anfangsbedingungen festgelegt: relative Größe und Anzahl der Sterne (die Anfangsmassenfunktion), Anzahl der Doppelsysteme und Planeten, anfängliche Örter und Geschwindigkeiten der Sterne und ihre Dichten, ihre räumliche Verteilung sowie das viriale Gleichgewicht (das die Gesamtenergie des Systems definiert).

Während der Integration wird jeder Stern in zwei Zeitschritten verfolgt: einem für seine physikalische Entwicklung (t_{evol}) und einem für seine dynamischen Wechselwirkungen (t_{dyn}). Die Zeitschritte sind für jeden Stern anders: Massereiche Sterne entwickeln sich schnell und haben kurze t_{evol}-Schritte, während sich massearme langsamer entwickeln und längere t_{evol}-Zeitschritte haben. Analog haben schnelle Sterne im dichten Haufenzentrum kurze, die langsameren außen im Haufen lange t_{dyn}-Zeitschritte.

Aktualisiert wird das System in Gruppen von Himmelskörpern mit ähnlichen t_{dyn}-Schritten. Die physikalische Entwicklung eines Sterns kann mehr als einmal aktualisiert werden, bevor ein neuer t_{dyn}-Zeitschritt beginnt (wenn $t_{evol} < t_{dyn}$). Nach einer gewissen Zeit (t_{adj}) wird das System auf physikalische Konsistenz geprüft. Himmelskörper, die an den Rand des Kugelhaufens gewandert sind, können aus dem System entfernt werden, was dem »Verdampfen« des Haufens durch Gezeitenkräfte der Galaxis entspricht. Auch andere astrophysikalische Prozesse werden während der Integration berücksichtigt (siehe Kasten rechts).



GRAFIKEN DIESER DOPPELSEITE: AMERICAN SCIENTIST



▷ entstanden, sollten dieses Schicksal teilen. Damit wäre es praktisch unmöglich, diese sehr kalten, dunklen und einsamen Welten nachzuweisen.

Es gibt aber noch einen weiteren Platz, wo Free-Floater gefunden werden könnten: in den sehr dichten Kugelsternhaufen. Im Gegensatz zu den jungen Assoziationen in einer stellaren Kinderstube sind die Sterne in Kugelhaufen gravitativ aneinander gebunden. Und diese Haufen sind auch nicht wenige Millionen, sondern über zehn Milliarden Jahre alt. Angesichts ihrer völlig unterschiedlichen Eigenschaften mag es seltsam erscheinen, dass offene wie kugelförmige Sternhaufen gleichermaßen viel versprechende Jagdgründe für Free-Floater sein sollen – aber das könnte tatsächlich der Fall sein.

Planeten-Suche in 47 Tucanae

Die erste Suche nach Planeten in einem Kugelsternhaufen kümmerte sich gar nicht um Free-Floater. Im Juli 1999 beobachteten Ronald Gilliland und seine Kollegen mit der Wide Field Planetary Camera 2 des Hubble-Weltraumteleskops fast 34 000 Sterne in dem Kugelhaufen 47 Tucanae. Dieser ist einer der größten und dichtesten Kugelhaufen unseres Milchstraßensystems (Bild auf Seite 40). Er enthält mehrere Millionen Sterne, und in jedem Kubiklichtjahr seines Zentralbereichs drängen sich fast 3000 von ihnen. (Zum Vergleich: In einem Kubiklichtjahr rund um die Sonne befindet sich kein einziger weiterer Stern; der nächste ist über vier Lichtjahre entfernt.) Weil 47 Tucanae sehr alt ist, hoffte Gillilands Team auf Erkenntnisse über Planetensysteme alter Sterne.

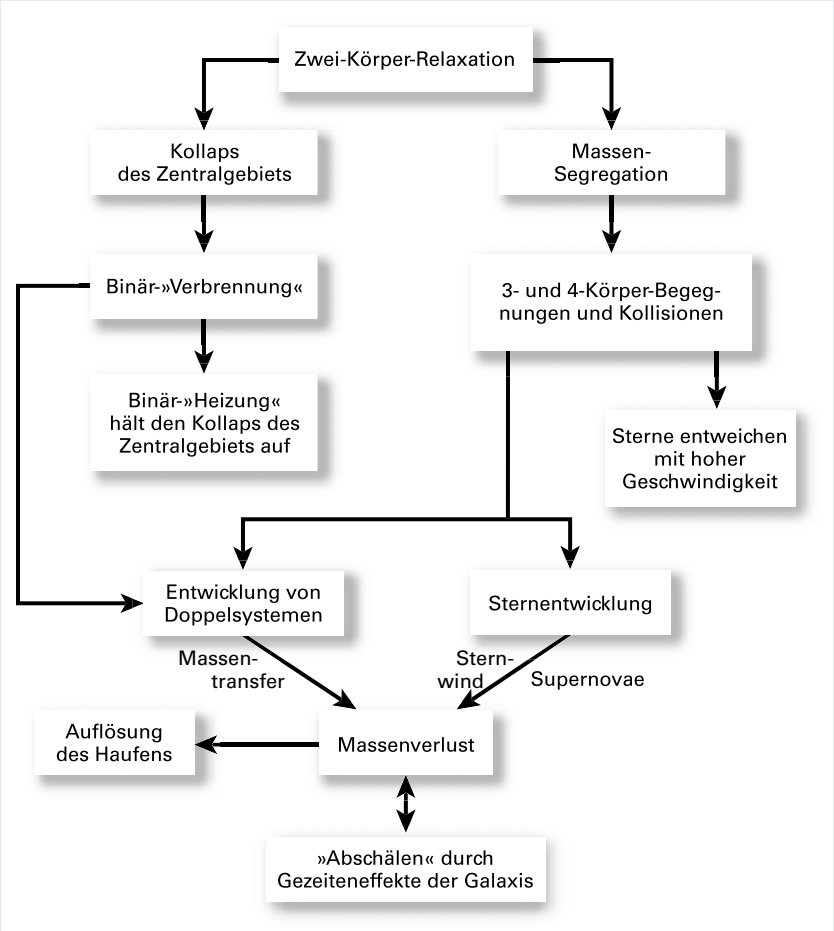
Das Hubble-Weltraumteleskop sollte diese Planeten durch so genannte Transits nachweisen: Die Helligkeit eines Sterns würde geringfügig abnehmen, sollte ein Planet vom Teleskop aus gesehen vor ihm vorbeiziehen. Wenn es in 47 Tucanae so viele Planeten gäbe wie in der Nachbarschaft der Sonne, dann sollten rund zwanzig Riesenplaneten mit engen Umlaufbahnen entdeckt werden. Also sollte es bei jedem 1700sten Stern im Kugelhaufen messbare Transits geben. Wieder und wieder maß das Hubble-Weltraumteleskop die Helligkeiten der 34 000 Sterne. Doch am Ende der Beobachtungskampagne stand fest: Es gab keinen einzigen Helligkeitseinbruch, der auf einen Planetentransit hinweisen würde.

Wie ist dieser negative Befund zu erklären? Womöglich hängt das Auftreten von Riesenplaneten in engen Umlauf- ▷

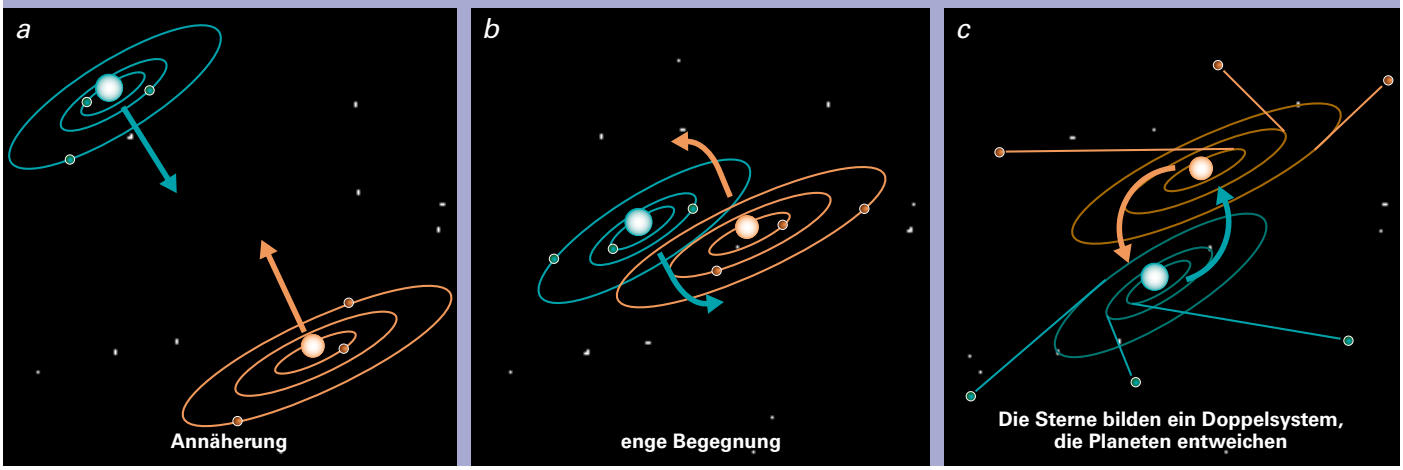
Viele Sterne sind des Haufens Tod

Mehrere astrophysikalische Prozesse müssen die Astronomen in der Simulation berücksichtigen, um die Entwicklung eines Kugelsternhaufens korrekt zu modellieren. Durch Zwei-Körper-Relaxation tauschen Sterne Energie aus, bis letztlich jeder in etwa dieselbe Menge davon hat. Massereiche Sterne werden dadurch langsamer und driften in Richtung Zentrum; masseärmere hingegen werden schneller und wandern in die Außenbereiche des Haufens. Diese so genannte Massen-Segregation beeinflusst die Häufigkeit, mit der sich Sterne begegnen, und erhöht die Anzahl derjenigen, die aus dem Haufen herausgeschleudert werden. Durch das Absinken der massereichen Sterne in das Zentralgebiet nimmt dort die Dichte zu, wodurch die Zahl der Begegnungen und Kollisionen (Binär-»Heizung«) ansteigt und der Kollaps des Zentralgebiets verzögert wird. Durch Binär-»Verbrennung« rücken enge Doppelsysteme noch näher zusammen, während lockere Paare (einschließlich Planetensystemen) aufgebrochen werden.

Diese Prozesse beeinflussen wiederum die Entwicklung von Doppelsystemen und einzelnen Sternen. Der ineffiziente Massenaustausch zwischen Doppelsternen führt dazu, dass Masse aus dem System verloren geht. Auch Einzelsterne können Masse verlieren: Massereiche Sterne explodieren als Supernovae, masseärmere geben beständig Masse über ihren Sternwind ab. Gezeiteneffekte durch die Gravitation des Milchstraßensystems schälen allmählich Masse vom Haufen ab, zusammen mit den leichten Sternen, die in dessen Außenbereich gewandert sind. Irgendwann sind so viele Sterne herausgeschleudert oder herausgezogen worden, dass sich der Haufen vollends auflöst. Durch solche Prozesse könnten viele Planeten ihrem Zentralgestirn entrissen werden.



Szenario 1: Frei treibende Planeten entstehen durch Begegnungen von Planetensystemen in dichten Sternhaufen



Zwei Szenarien, durch die Himmelskörper von Planetengröße entstehen könnten. In einem dichten Sternhaufen *(a)* kann eine Begegnung zwischen zwei Planetensystemen *(b)* einige der Trabanten dem Zentralstern entreißen *(c)*. Hier hat sich durch die Begegnung ein Doppelsystem gebildet, ein sehr seltener Vorgang. In den meisten Fällen genügt bereits der sanfte Schwerkraftzug durch einen vorbeiziehenden Stern, um einige Planeten freizusetzen. Es ist ebenfalls möglich, dass sich Objekte von Planetengröße in einer Molekülwolke *(d)* genauso bilden wie ein gewöhnlicher Stern. Wenn diese Objekte in einem dynamisch instabilen System *(e)* entstehen, können sie entweichen *(f)*, anstatt an einen Stern gebunden zu bleiben.

▷ bahnen von der chemischen Zusammensetzung des Zentralsterns ab. Die Suche nach extrasolaren Planeten in der Nachbarschaft der Sonne hat nämlich ergeben, dass metallreiche Sterne – im Sprachgebrauch der Astronomen sind das Sterne mit einem relativ hohen Anteil an Elementen schwerer als Helium – mindestens zehnmal häufiger Planeten mit kurzen Bahnperioden besitzen als metallarme Sterne. Der Grund für diesen Zusammenhang wird noch diskutiert, aber hier genügt es festzustellen, dass die alten Sterne in 47 Tucanae generell sehr metallarm sind: Der Anteil schwerer Elemente in ihnen beträgt nur etwa ein Fünftel des solaren Wertes. Die Sterne in diesem Haufen entstanden so früh in der Geschichte des Milchstraßensystems, dass es noch kaum schwerere Elemente gab. Kurioserweise wurde aber ein extrasolarer Planet im Orbit um einen Pulsar im metallarmen Kugelhaufen M 4 gefunden.

Eine andere Möglichkeit ist, dass die hohe Sterndichte in einem Kugelsternhaufen auf irgendeine Weise die Bildung von Planeten unterdrückt oder es verhindert, dass Riesenplaneten bis in enge Umlaufbahnen um ihre Sonnen wandern. Möglicherweise wurden auch Trabanten bald nach ihrer Entstehung wegen des nahen Vorübergangs eines der vielen Nachbarsterne ihrem ursprünglichen Zentralstern entrissen und in den Kugelhaufen hinausgeschleudert. Da sich Gillilands Team auf Transits von Planeten in engen Umlaufbahnen konzentrierte, wären ihm Free-Floater entgangen.

Im Sommer 2001 war in einer Veröffentlichung von mehreren Kandidaten für frei treibende Planeten im Kugelsternhaufen M 22 die Rede. Es stellte sich jedoch heraus, dass Treffer kosmischer Strahlungsteilchen in der Kamera des Hubble-Weltraumteleskops die Planeten-Effekte nur vorgetäuscht hatten: Die Entdeckungsmeldung wurde wieder zurückgezogen.

Rechnermodell eines Kugelhaufens

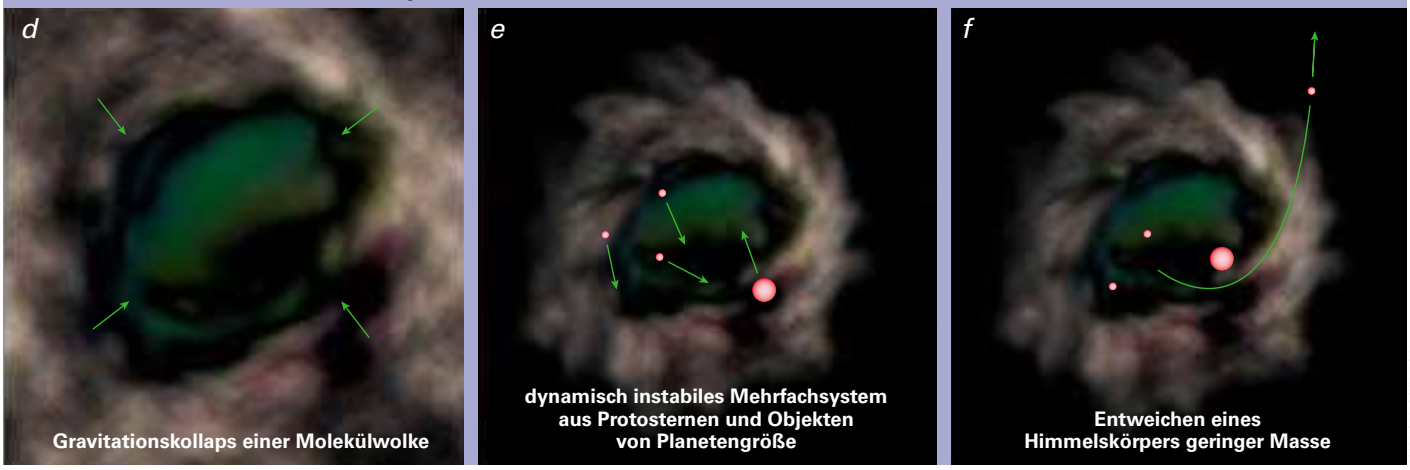
Aus dem missglückten Nachweis irgendwelcher extrasolarer Planeten in 47 Tucanae müssen wir wohl folgern, dass das Schicksal eines Planeten innerhalb eines Kugelsternhaufens sich sehr von dem eines Planeten in weniger dichter Umgebung unterscheidet. Die engen Begegnungen und gar Kollisionen zwischen den Sternen in diesen dicht bevölkerten Regionen müssen tiefgreifende Folgen für den Bestand von Planetensystemen haben. Mehrere Astrophysiker, darunter auch wir, haben versucht, deren Schicksal zu modellieren.

Dazu müssen wir zunächst einmal ein vernünftiges Computermodell eines Kugelsternhaufens erstellen – und das ist nicht leicht. Zwar gibt es dafür eine Reihe von Verfahren, aber um das dynamische Verhalten jedes Sterns zu verfolgen, verwenden wir eine so genannte N-Körper-Simulation. Wegen der enormen Zahl von Sternen in einem Kugelhaufen stellt das eine große Herausforderung an die Rechenkunst. Es ist schlicht unmöglich, die Wechselwirkungen von Millionen von Sternen zu berücksichtigen – wir müssen uns in unseren gegenwärtigen Simulationen mit rund 10 000 Sternen begnügen. Selbst das geht nur mit speziell für diese Aufgabe entwickelter Hardware. Die jüngste Inkarnation dieser Computer ist Grape-6 (Gravity Pipe), eine Maschine für eine Billion Gleitkomma-Operationen pro Sekunde (Teraflops), die Jun Makino und sein Team an der Universität von Tokio entwickelten (Bild auf Seite 41).

Des Weiteren ist ausgeklügelte Software vonnöten, um die Prozesse in einem Sternhaufen modellieren zu können. In den vergangenen dreißig Jahren haben Sverre Aarseth vom Astronomischen Institut in Cambridge (England) und seine Kollegen immer bessere N-Körper-Programme erstellt. Aarseths NBODY4-Code, auf dem unsere Simulationen basieren, wurde speziell für die Grape-Maschinen geschrieben (siehe das Flussdiagramm auf Seite 42).

Im ersten Schritt müssen die Anfangsbedingungen im Kugelhaufen aufgestellt werden. Dazu zählen solche Variablen wie die anfängliche Massenfunktion, der Anteil schwerer Elemente in den Sternen, die Anzahl der Doppelsterne und ihre Bahndaten, die Anzahl der Planeten und die räumliche Verteilung der Sterne. Massen, Örter und Geschwindigkeiten der Haufensterne werden auch dadurch eingeschränkt, dass der Haufen in virialem Gleichgewicht beginnt – eine generelle Eigenschaft von

Szenario 2: Frei treibende Himmelskörper von Planetengröße entstehen wie Sterne



gravitativ gebundenen Systemen, die besagt, dass der Absolutbetrag der potenziellen Energie das Doppelte der kinetischen Energie innerhalb des Systems ist. All diese Angaben definieren einen Kugelhaufen des »Alters null«, in dem es kein Gas mehr gibt und keine Sterne mehr entstehen.

Wo sind all die Planeten geblieben?

Nun kann das dynamische Verhalten aller Himmelskörper (Sterne wie Planeten) im Haufen simuliert werden. Die klassische Physik gibt vor, welche Kraft auf jeden Körper wirkt, wo er sich nach dem nächsten Zeitschritt befindet und welche Geschwindigkeit er dann hat. Zugleich entwickeln sich die Sterne und Sternpaare aber auch weiter, und eine Reihe zusätzlicher astrophysikalischer Effekte muss ebenfalls berücksichtigt werden (Kasten auf Seite 43). So verändert sich der Sternhaufen auch selbst, indem seine zentrale Dichte immer weiter ansteigt, während er im Außenbereich durch Gezeitenwirkung des Milchstraßensystems Sterne verliert. Unserer Meinung nach liefert dieses Integrationsverfahren einen guten Eindruck davon, wie sich richtige Kugelsternhaufen mit hunderttausenden oder Millionen Sternen verhalten.

Wir haben drei Simulationen durchgeführt, wobei wir jeweils 22 000 Haufensterne (ein Zehntel davon Doppelsysteme) sowie 2000 bis 3000 Riesenplaneten von Jupitergröße berücksichtigten. Diese Simulationen unterschieden sich durch den Gehalt an schweren Elementen in den Sternen und durch die Abstände der Planeten von ihren Zentralsternen. Jede Simulation umfasste 4,5 Milliarden Jahre, entsprechend dem Alter des Sonnensystems.

Die Planeten, die anfangs alle um einen Stern kreisten, erlitten dabei unterschiedliche Schicksale. Nach vier Milliarden Jahren, als nur noch ein Viertel der ursprünglichen Haufenmasse vorhanden war, hatte sich ein Zehntel der Planeten von ihren Zentralgestirnen gelöst und trieb frei umher; 13 Prozent davon befanden sich noch im Haufen. Zwei Drittel der Planeten hatten den Haufen zusammen mit ihren Sonnen verlassen, um die sie noch immer kreisten. Jeder Hundertste war von seinem Zentralstern verschluckt worden, und fast vier Prozent fanden sich im Orbit um einen anderen Stern wieder.

Die Simulationen haben auch gezeigt, dass Planeten, die rund das Fünfzigfache des Abstandes Erde – Sonne von ihrem Zentralstern entfernt sind, zehnmal wahrscheinlicher von ihren Sonnen getrennt werden als solche, die eine erdähnliche Umlaufbahn beschreiben. Wenngleich Planeten vor allem im dichten Zentralgebiet des Haufens freigesetzt werden, erreicht weniger als die Hälfte von ihnen eine Geschwindigkeit, die ausreichen würde, den Haufen zu verlassen. Die meisten Free-Floater werden also tief im Inneren des Haufens zu Waisen und wandern langsam in die Außenbezirke. Innerhalb des Haufens findet man einen Free-Floater typischerweise knapp außerhalb einer Zone, welche die halbe Masse des Haufens umschließt. Und um vom Zentralbereich bis dorthin zu gelangen, brauchen die Free-Floater rund 200 Millionen Jahre.

Die meisten Planetensysteme, die den Haufen verlassen, verdanken dies einem permanenten »Abschälen« der äußeren Sterne durch das Gezeitenfeld der Galaxis. Eine geringere Zahl von Sternen und Planeten wird aus dem Haufen geschleudert, nachdem sie durch enge Begegnungen mit anderen Haufensternen auf Fluchtgeschwindigkeit beschleunigt wurden. Die meisten Begegnungen haben aber eher die Befreiung eines Planeten zur Folge als einen Rauswurf aus dem Haufen.

Diese Resultate sind faszinierend, denn sie legen nahe, dass es in einem typischen Kugelsternhaufen auch heute noch eine größere Zahl von Jupiter-großen, frei treibenden Himmelskörpern geben sollte, selbst nach Jahrmilliarden eines stellaren Billardspiels. Warum die Suche in 47 Tucanae nichts ergeben hat, ist noch unklar – es kann ebenso gut an seiner Metallarmut wie an seinem dynamischen Innenleben liegen. Vielleicht sollte sich eine künftige Suche nach Exoplaneten auf einen weniger dichten und metallreicheren offenen Sternhaufen konzentrieren. ◁

Jarrod R. Hurley ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am American Museum of Natural History in New York City. Er untersucht die Entwicklung von Sternhaufen mittels Computersimulationen. Seine Modelle haben geholfen, die Entstehung der »Blauen Vagabunden« im offenen Sternhaufen M 67 zu erklären. **Michael M. Shara** leitet die Abteilung für Astrophysik des Museums. Seine Forschungsgebiete umfassen die Struktur und Entwicklung von Novae und Supernovae, Kollisionen von Sternen und die Natur der Sternpopulationen in Sternhaufen und Galaxien.

© American Scientist Magazine (siehe www.americanscientist.org)

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

Free-Floating Planets: Not so Surprising. Von J. R. Hurley und M. M. Shara in: The Astrophysical Journal, Bd. 565, S. 1251 (1. Februar 2002).

Discovery of Young, Isolated Planetary Mass Objects in the Sigma Orionis Star Cluster. Von M. R. Zapatero Osorio et al. in: Science, Bd. 290, S. 103 (2000).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Süße Medizin

Lange waren Zucker ein Stiefkind biologischer Forschung, trotz ihrer vielfältigen Funktionen im gesunden wie im kranken Körper. Doch die moderne Zucker-Biotechnologie trägt inzwischen Früchte: Sie ermöglicht die Entwicklung neuer Medikamente.

Von Thomas Maeder

Alles scheint sich derzeit um Gene und ihre Produkte zu drehen. Kaum war im Jahr 2000 das menschliche Genom weitgehend entziffert, richtete sich das Interesse schon auf das Proteom: die Gesamtheit aller Proteine, die in den Zellen nach den Bauplänen ihrer Gene entstehen. Das ist nur allzu verständlich. Immerhin erledigen Eiweißstoffe die meisten Aufgaben im menschlichen Körper, und ihr Verhalten galt es nun zu verstehen. Solche Forschungen – so verkündeten überdies Presseberichte – sollten eine wahre Flut von Ideen hervorbringen, wie Krankheiten aller Art zu heilen wären.

Nüchtern betrachtet sind lebende Zellen freilich mehr als nur Erbsubstanz und Proteine. Eine tragende Rolle kommt auch zwei anderen großen Klassen von Molekülen zu, den Kohlenhydraten und Lipiden – vereinfacht: den Zuckern und Fetten. Wer also wirklich wissen möchte, wie die »Maschine Mensch« funktioniert und wie man ihre Störungen behandeln kann, sollte diese molekularen Akteure gleichfalls im Auge haben.

Besonders die Kohlenhydrate sind für eine erstaunliche Bandbreite von Aufgaben zuständig. Sie dienen nicht bloß, wie einst angenommen, vor allem als Brennstoff, Energiespeicher oder Konstruktionselemente. Vielmehr gehen sie eine Verbindung mit Protein- und Fettmolekülen der Zelloberfläche ein und beeinflussen dank dieser exponierten Stellung vieles – von der Kommunikation zwischen den Zellen bis zur Arbeit des Immunsystems. Solche Zuckerkomponenten sind zum Beispiel beteiligt, wenn

- verschiedene Krankheitserreger Zellen befallen,
- Krebs sich ausbreitet,
- Zellen einander erkennen,
- patrouillierende Zellen an einen Gefahrenherd gelockt werden.

Das süße Beiwerk ist auf einer Körperzelle so allgegenwärtig, dass diese für ihre Nachbarn und für das Immunsystem regelrecht wie in einen Zuckermantel gehüllt erscheint.

Angesichts der Bedeutung für Krankheit und Gesundheit verstärken akademische und industrielle Forschungseinrichtungen seit einiger Zeit ihre Bemühungen, den Aufbau und die Aktivitäten dieser Moleküle und ihrer Bindungspartner genau zu ermitteln, denn mit solchen Erkenntnissen lassen sich neue therapeutische Wirkstoffe entwickeln. Beispielhaft dafür steht das »Consortium for Functional Glycomics«, eine Allianz Dutzender Wissenschaftler verschiedener Disziplinen in aller Welt. Ihnen geht es vor allem darum, die Forschung auf diesem Gebiet international zu koordinieren und zu erleichtern, beispielsweise durch den Aufbau einer Sammlung künstlich hergestellter Zuckerketten und einer für alle zugänglichen Datenbank der molekularen Strukturen.

Der Begriff »funktionale Glykomik« im Namen des Konsortiums spielt an auf die ebenfalls neuen, aber schon bekannteren Bezeichnungen Genomik und Proteomik, also auf die Genom- und Proteomforschung. Er leitet sich wiederum von dem älteren Begriff »Glykobiologie« ab. Geprägt hatte ihn 1988 Raymond A. Dwek an der Universität Oxford. Die Vorsilbe »Glyko« verweist im Sprachgebrauch der Chemie auf etwas Süßes oder eben Zucker, nach griechisch *glykos*. Wie der Zusatz »-biologie« schon impliziert, geht das Wissenschaftsgebiet über die reine Kohlenhydrat-Chemie hinaus, betrachtet insbesondere auch die Funktion der Moleküle im Organismus.

Das Fachvokabular, mit denen Kohlenhydratforscher jonglieren, kann durchaus einschüchtern. Im Prinzip zählen sie aber zunächst einmal nur die Zuckereinheiten: Der bekannte Traubenzucker, die

IN KÜRZE

- Viele Proteine und Fette auf **Zellen tragen Zuckerketten**. Diese sind an biologischen Abläufen wie der Kommunikation zwischen Zellen und an Immunreaktionen beteiligt. Außerdem spielen Zucker bei ganz verschiedenen Erkrankungen eine Rolle, von Virusinfektionen über Erbleiden bis zu Krebs.
- Die Struktur komplexer Zuckermoleküle zu analysieren und für Medizin und Forschung nachzubauen, gelingt zunehmend besser. Dies stellt **neue Medikamente** für unterschiedliche Erkrankungen in Aussicht.

RANDI BEREZ

Erfolg der Zucker-Biotechnologie: Seit einigen Monaten ist das Blut bildende Hormon Erythropoietin alpha in verbesserter Version auch europaweit zugelassen. Zwei zusätzliche Zuckerketten befähigen »Aranesp«, länger als die gentechnisch hergestellte Originalsubstanz im Körper zu verweilen. Eingesetzt wird es bei Blutarmut.

Glucose, ist beispielsweise ein »Einfachzucker« aus wenigen Atomen Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff. Der gewöhnliche Haushaltszucker, die Saccharose, setzt sich aus zwei Untereinheiten zusammen. Er gehört zu den Mehrfachzuckern, die bis etwa ein Dutzend Einheiten umfassen können. Eine scharfe Obergrenze existiert hier nicht. Alle deutlich größeren Ketten heißen jedenfalls Vielfachzucker. Fachlich entspricht dies den Begriffen Mono-, Di-, Oligo- und Polysaccharid. Wenn Kohlenhydrate sich fest mit Proteinen oder Fetten verbandeln, sprechen Wissenschaftler von Glykoproteinen und Glykolipiden. Und damit hat man schon das kleine Einmaleins der Zucker gelernt.

Kohlenhydrate standen keineswegs aus mangelnden Interesse im Schatten anderer Moleküle. Vielmehr fehlten den Wissenschaftlern Mittel und Wege, um die Struktur kompliziert verknüpfter Zucker aufzuklären und die Moleküle auch in immer gleicher Form künstlich herzustellen. Ohne ausreichende Mengen ließ sich die interessierende Substanz aber schlecht untersuchen oder gar als medizinischer Wirkstoff nutzen.

Die Schwierigkeiten entspringen zum großen Teil der außerordentlichen strukturellen Vielfalt der Zucker. Ein Vergleich mit anderen Kettenmolekülen illustriert dies eindrücklich. Bei der Erbsubstanz DNA etwa reiht sich eine Auswahl von vier unterschiedlichen Grundbausteinen aneinander, wie Perlen auf einem Faden. Verknüpft sind sie immer durch dieselbe Art von chemischer Bindung. Entsprechendes gilt für die Proteine mit ihren zwanzig gängigen Bausteinen. Im Gegensatz dazu können sich die etwa zehn verschiedenen Einfachzucker, die in den Kohlenhydraten der Säugetiere vorkommen, an vielen Punkten miteinander verbinden und so kompliziert verzweigte Strukturen bilden. Und das ist noch nicht alles: Selbst wenn zwei Zuckereinheiten über die gleichen Kohlenstoffatome verknüpft sind, können sie relativ zueinander zwei unterschiedliche Orientierungen haben.

Ein Naturstoff gegen Thrombosen

Dieser variable Aufbau lässt eine Unmenge von Kombinationen zu. Man betrachte dazu einmal einen ganz kurzen Abschnitt aus nur vier verknüpften Einheiten. Bei der DNA mit ihrem Alphabet aus nur vier »Buchstaben« ergeben sich schon 256 unterschiedliche Varianten. Proteine mit ihrer Auswahl an zwanzig verschiedenen Aminosäuren bringen es schon auf ungefähr 16 000 denkbare Versionen – wohlgemerkt für einen solchen kurzen Abschnitt. Doch mit theoretisch über 15 Millionen möglichen Anordnungen im Quartett stellen die Zucker das leicht in den Schatten. Obwohl nicht alle diese Kombinationen in der Natur vorkommen, ist die Variabilität dennoch beeindruckend.

Selbst heutzutage bleibt es daher eine echte Herausforderung, die Abfolge der Bausteine in komplexen Zuckern zu bestimmen und diese auch nachzubauen. Mittlerweile haben Wissenschaftler aber Methoden ausgetüftelt, die solche Unterfangen erleichtern (siehe Kasten auf Seite 50/51). Mehr noch als die Genomforschung wird die Glykomik jedenfalls von Weiterentwicklungen in den molekularen Sequenziertechniken und in der Bioinformatik profitieren.

Glykomik hilft zunächst einmal, schon existierende Medikamente zu verbessern. Das bislang eindrucksvollste Beispiel bietet das gerinnungshemmende Heparin: Das Polysaccharid besteht aus einer langen Kette von Zuckereinheiten und kommt in verschiedenen Geweben vor. Seit etwa 1935 wird der Naturstoff vorbeugend gegen Thrombosen bei Operationen verabreicht und zählt zu den meistverkauften Medikamenten der Welt. Allerdings sind die kommerziellen Präparate, die aus der Schleimhaut von Schweinedärmen gewonnen werden, oft ein schlecht charakterisiertes Gemisch von Molekülen mit Längen zwischen 200 und 250 Einzelbausteinen. Die Wirksamkeit des Heparin-Präparats und die Gefahr unerwünschter Nebenwirkungen schwanken von Hersteller zu Hersteller, ja sogar von einer Produktionscharge zur nächsten, sodass dort jede einzelne auf ihre Aktivität geprüft werden muss. ▷

Inzwischen verkaufen Pharmaunternehmen auch niedermolekulare Versionen des Heparins mit weniger Nebenwirkungen. Ihm wurden viele medizinisch nicht relevante Abschnitte entfernt. Doch wie beim längeren Molekül haben auch hier die Hersteller Probleme, homogene Ergebnisse zu erzielen. Im Jahr 2000 entschlüsselten Ram Sasisekharan und seine Kollegen am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge mit selbst entwickelten Verfahren die Sequenz des gesamten aktiven Zentrums vom Heparin. Das ist die Region, die für seine biologische Wirkung verantwortlich ist. Anhand dieses Wissens bemüht man sich nun um einen verlässlichen Syntheseweg für hochwirksame kleine Heparin-Varianten, deren pharmakologische Eigenschaften sich für unterschiedliche Anwendungszwecke maßschneidern lassen.

Süßer Schutz

Auch die Effektivität von therapeutischen Proteinen, die auf gentechnischem Wege hergestellt werden, lässt öfter zu wünschen übrig. Einige dieser Proteine können nämlich nur gut wirken, wenn sie an genau festgelegten Stellen mit bestimmten Zuckern bestückt sind. Ein Beispiel dafür ist das gentechnisch hergestellte Erythropoietin, das die Produktion roter Blutkörperchen anregt. Verabreicht wird es Patienten, die an einer Anämie, also einer Blutarmut leiden, etwa infolge einer Krebstherapie oder von chronischem Nierenversagen. Über Jahre hinweg musste das amerikanische Biotech-Unternehmen Amgen achtzig Prozent seiner Produktion verwerfen, weil die »Zuckergarnitur« nicht stimmte und das Erythropoietin deshalb zu schnell aus dem Blut verschwand. Dann fand sich ein Weg, zwei weitere Zucker zusätzlich zu den natürlichen Pendants an den Wirkstoff zu koppeln. Diese unter dem Handelsnamen Aranesp erhältliche Version verbleibt sogar viel länger als das Original im Blut und muss daher seltener injiziert werden.

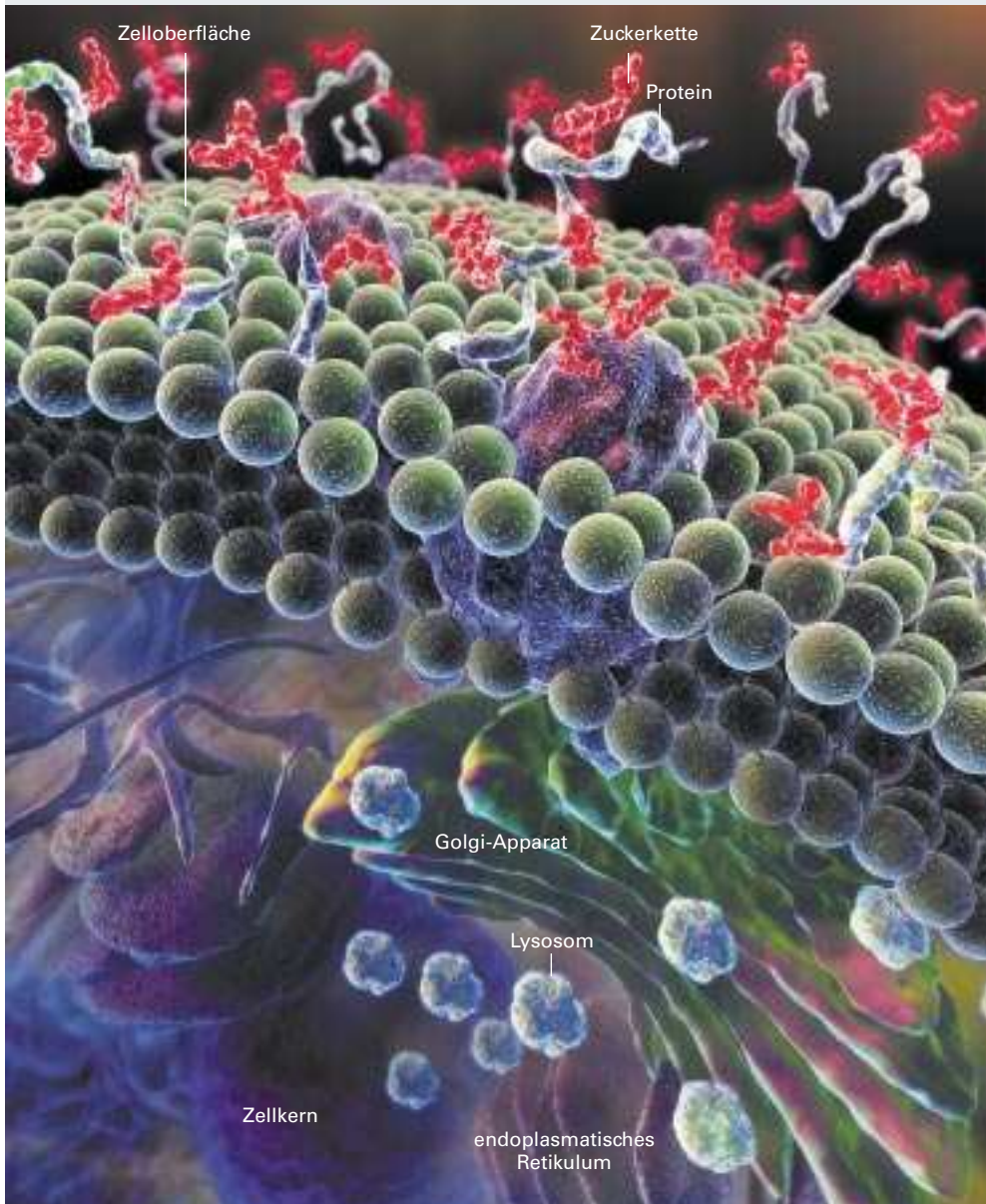
Pharmaunternehmen widmen sich aber vor allem der Glykomik, um ganz neuartige Medikamente und Vakzine für unterschiedliche Erkrankungen zu entwickeln. Als Wirkstoffe kommen Zucker oder damit bestückte Proteine und Lipide in Frage, aber auch Substanzen, die in die Interaktionen zwischen Zuckern und anderen Molekülen eingreifen. Denkbar sind beispielsweise Moleküle, die bestimmte Enzyme für den Auf- oder Abbau von zuckerbestückten Proteinen und Lipiden hemmen.

Ein Feld, auf dem Zuckerverbindungen bereits bemerkenswerte Erfolge zu verzeichnen haben, ist die Bekämpfung von Infektionskrankheiten. Der vorbeugende Impfstoff gegen das Bakterium *Haemophilus influenzae* Typ b stellt ein Paradebeispiel dafür dar. Der Erreger verursacht vor allem bei Kindern, wenn er in die Lunge oder ins Blut gelangt, schwere Probleme wie eine mitunter tödlich verlaufende Form von Hirnhautentzündung. Der Impfstoff konfrontiert das Immunsystem mit Zuckerbestandteilen der Kapsel des Bakteriums. Daran wird der Eindringling später rasch erkannt und bekämpft. Eine frühe Version des Impfstoffs, die lediglich eine Zuckerkette des Bakteriums enthielt, hatte die Erwartungen enttäuscht. Erst die Kombination mit einem Protein, das dem Immunsystem kräftig auf die Sprünge hilft, erwies sich als hochwirksam. Bereits seit Ende der 1980er Jahre sind derartige Präparate auf

Wie süße Medizin wirkt

Zuckerwerk der Zellen

Viele Proteine und Lipide (Fette) der Zelloberfläche sind mit Zuckerketten, also mit Kohlenhydraten, bestückt. Angehängt bekommen sie das Beiwerk vorher in speziellen Arbeitsräumen der Zelle (großes Bild unten): dem endoplasmatischen Retikulum und dem Golgi-Apparat. Den Abbau solcher Glyko-Verbindungen übernehmen andere Zellabteile, die so genannten Lysosomen. Die kleineren Abbildungen illustrieren einige der vielen therapeutischen Ansätze, die sich aus den Einblicken in die Struktur, Funktion und Verarbeitung von Kohlenhydraten im Körper ergeben haben.



dem Markt. Die Impfung wird in weiten Teilen der Welt eingesetzt und auch in Deutschland für Kinder bestimmter Altersgruppen empfohlen.

Weitere Verbindungen von Zuckerketten mit Proteinen oder Lipiden werden für ähnliche Zwecke untersucht. Klinische Studien laufen unter anderem für einen Impfstoff gegen schwer bekämpfbare Infektionen mit dem Bakterium *Staphylococcus aureus*, wie sie beispielsweise leicht bei Patienten auf Intensivstationen auftreten (siehe Tabelle Seite 52).

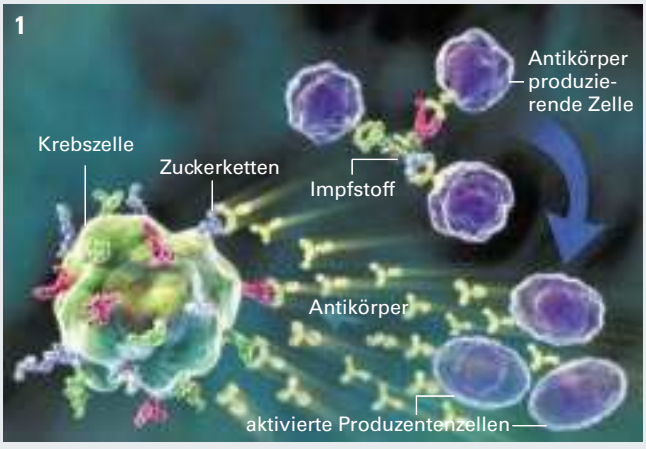
Verschiedene Krankheitserreger erkennen selbst wieder ihre bevorzugten Zielzellen an charakteristischen Kohlenhydraten und interagieren mit den Molekülen. Einige Medikamente – künftige, aber ebenso bereits erhältliche – greifen an diesem Punkt an: Bestimmte Zucker oder sie imitierende Substanzen sollen eine Interaktion verhindern.

Ein Beispiel bietet das Grippevirus. Es kann eine Zelle nur befallen, wenn es zuerst an den Aminozucker Sialinsäure andockt, der in Glykoproteinen an der Zelloberfläche vorkommt. Dieser Kontakt öffnet letztlich dem Erreger das Tor ins Zellinnere, wo dann neue Virusparikel hergestellt werden. Verlassen diese die Zelle, können sie aber wiederum an der Sialinsäure hängen bleiben. Die Viruspartikel befreien sich dann mit Hilfe ihres Enzyms ▷

Therapeutische Ansätze

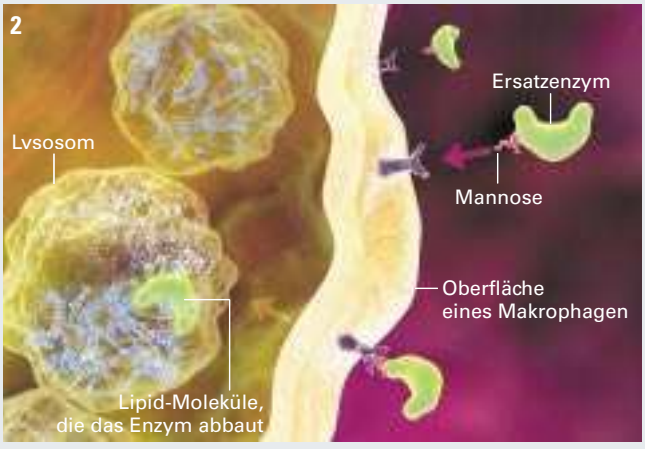
1. Krebsbekämpfung

Oft tragen Krebszellen ungewöhnliche Zuckerversionen auf ihrer Oberfläche. Eine Idee ist, alle diese Zucker in einen Impfstoff einzubauen. Er soll das Immunsystem veranlassen, passende Antikörper zu bilden. Die Immunmoleküle markieren ihr Opfer – die Krebszelle – als zu zerstörendes Ziel.



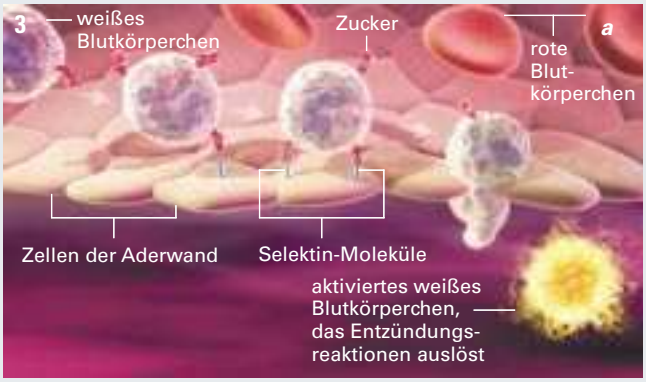
2. Linderung lysosomaler Speicherkrankheiten

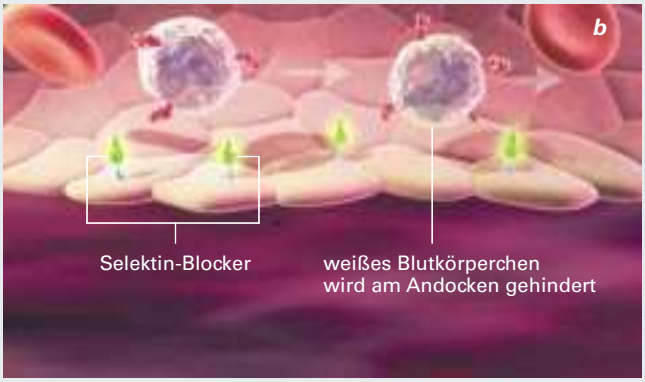
Bei etlichen Erbkrankheiten ist irgendeines der Enzyme defekt, die zuckerbestückte Lipide in den Lysosomen abbauen. Im Falle der so genannten Gaucher-Krankheit, einer angeborenen Störung, wird inzwischen ein Ersatzenzym verabreicht, an das zusätzlich Mannose gekoppelt ist. Dieser Einfachzucker stellt den Kontakt zu den als Makrophagen bezeichneten Fresszellen her. Diesen Zelltyp trifft der Enzymmangel besonders hart.



3. Entzündungen unterdrücken

Entzündungen treten dann auf, wenn weiße Blutkörperchen ins Gewebe eindringen (*a*, unten). Um das Blut zu verlassen, heften die Zellen sich zuerst über eine ihrer Zuckerketten locker an das Molekül Selektin auf den Wandzellen der Adern. Neue entzündungshemmende Stoffe sollen die weißen Blutkörperchen daran hindern, am Selektin anzudocken (*b*). Klinische Studien laufen derzeit an Patienten mit Asthma und Schuppenflechte.





ALLE ZEICHNUNGEN AUF DIESER DOPPELSEITE: JEFF JOHNSON, HYBRID MEDICAL ANIMATION

Neue Technologien für die Glykomik

Der Widerspenstigen Zähmung

Einige der größten aktuellen Erfolge der Biomedizin beruhen auf Fortschritten bei der molekularen Sequenzierung und der Datenverarbeitung. Davon könnte insbesondere auch das aufstrebende Gebiet der Glykomik profitieren. Es geht darum, mehr über Aufbau und Funktion komplexer Zuckerketten im Körper zu erfahren, sowie um Möglichkeiten, ihre Herstellung zu steuern. Innovative Analyse- und Syntheseverfahren legen den Grundstein für die Entwicklung neuer Medikamente, die mit Zuckern, also Kohlenhydraten, interagieren oder selbst daraus bestehen.

Im Vergleich zu Zuckern sind die linearen Molekülketten der Proteine und Gene im Prinzip einfach zu sequenzieren: Man schneidet von einem Ende her mit Enzymen Baustein für Baustein ab und bestimmt ihn jedes Mal. Die Bausteine von Zuckerketten können hingegen an verschiedenen Stellen und zudem auf verschiedene Weise miteinander verknüpft sein. Bei großen komplexen Zuckern mit verzweigten Ketten, die jede für sich bis ins letzte Ästchen entschlüsselt werden müsste, ist daher ein direktes Sequenzieren nicht mehr möglich.

Ram Sasisekharan vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambrige und seine Kollegen gehen deshalb zweigleisig vor: Sie arbeiten sich vom Großen zum Kleinen vor, gleichzeitig vom Speziellen zum Allgemeinen, um schließlich in der Mitte zu einem Resultat zu gelangen. Im ersten Schritt bestimmen die Forscher die Größe des Moleküls und lassen einen Computer eine Liste aller theoretisch möglichen Sequenzen aufstellen, unter Berücksichtigung aller denkbaren Abzweigungspunkte und Äste. Als Nächstes schließen sie viele dieser Sequenzen durch gezielte Experimente aus. So prüfen sie zum Beispiel, wie das Molekül von Enzymen zerlegt wird, die an genau bekannten Stellen – etwa zwischen einem bestimmten Zuckerpaar – schneiden. Ferner bestimmen sie, in welchem Verhältnis welche Einfachzucker vorkommen.

»Sobald Sie über ein umfassendes Sortiment von Testverfahren verfügen, ist es nicht mehr so fürchterlich kompliziert«, erläutert Ganesh Venkataraman vom M.I.T. Jede neu gefundene Bedingung engt das einst riesige Feld der möglichen Verbindungen ein Stückchen ein. »Man setzt sich wieder an den Rechner, tippt das Resultat des Experiments ein und schmeißt alles raus, was nicht dazu passt. Es ist wie eines dieser Rätsel, bei dem sieben Leute an einem Tisch sitzen und Sie einige Hinweise haben, wer neben wem sitzt oder eben nicht – und Sie müssen die Sitzordnung erraten.«

Das umgekehrte Problem – nämlich komplexe Zucker herzustellen – hat ebenfalls erst in neuerer Zeit bedeutend an Schwierigkeit verloren. Bei Proteinen ist diese Aufgabe vergleichsweise einfach: Hier existiert von Natur aus ein Bauplan, nämlich das jeweilige Gen; dank Gentechnik lässt es sich in Zellkulturen einschleusen, die dann beliebig viele Exemplare des Proteinmoleküls herstellen. Für Zucker existiert keine solche Vorlage. Für eine verzweigte Zuckerkette aus mehreren unterschiedlichen Bausteinen, für ein Oligosaccharid also, müssen in der Zelle verschiedene Enzyme nacheinander aktiv werden. Ein auf dem Reißbrett konzipiertes Oligosaccharid lässt sich unter Umständen mit Hilfe eines geeigneten Enzymsortiments herstellen. Wenn jedoch kein Enzym existiert, das die vorgesehenen Bausteine effizient und in der richtigen Orientierung miteinander verknüpft, müssen die Wissenschaftler aufwendige Alternativen finden.

Ein solches Verfahren hat die Arbeitsgruppe von Peter H. Seeberger am MIT für die Synthese von Oligosacchariden entwickelt. Sie geht dabei analog vor wie bei einem bekannten Verfahren zur künstlichen Herstellung von ganz kurzen Proteinketten. Zucker verbinden sich dort miteinander, wo sie Hydroxylgruppen, kurz OH-Gruppen, tragen. Die Wissenschaftler machen sich das zu Nutze, indem sie einen Einfachzucker an ein Plastikkügelchen koppeln und alle seine Hydroxylgruppen maskieren – mit

▷ Neuraminidase, das den Zucker katalytisch spaltet. Die Grippemedikamente Tamiflu und Relenza verkürzen bei rechtzeitiger Anwendung die Dauer der Erkrankung, indem sie das aktive Zentrum dieses Enzyms blockieren und es so daran hindern, die Sialinsäure zu spalten. Damit hat das Virus es wesentlich schwerer, sich den Weg freizuschneiden und zu anderen Zellen zu gelangen (siehe »Entwaffnung von Grippeviren«, Spektrum der Wissenschaft 3/1999, S. 70).

Die beiden neuen Grippemedikamente stellen ein Ersatzangriffsziel für das virale Enzym dar. Sie konkurrieren gewissermaßen mit dem richtigen Zucker um die Stelle im aktiven Zentrum. Siegen sie, bleiben sie wie ein Stöpsel darin stecken. Diese Art von Strategie wird als kompetitive Hemmung bezeichnet und könnte auch zur Bekämpfung anderer Erreger nützlich sein. Insbesondere ist hier das Bakterium *Helicobacter pylori* zu nennen, das Geschwüre und Entzündungen im Magen verursacht. Es fasst dort Fuß, indem es eine Bindung mit einem Zucker auf Zellen der Magenschleimhaut eingeht.

Gegen Schock und Krebs

Ein weiterer Kandidat ist das Bakterium *Shigella dysenteriae*, das tödliche Ruhrepidemien auslöst. Es produziert einen Giftstoff, der sich an Zucker auf den Darmzellen heftet. Geeignete Zucker-Imitate, die passende Bindungsstellen auf dem Magenbakterium beziehungsweise dem Toxin besetzen, verhindern ein Andocken an Zellen. Zumindest im Labor verliefen die Tests viel versprechend.

Eine ähnliche Strategie verfolgen Pharmaforscher gegen den septischen Schock, einen oft tödlichen Zusammenbruch des Kreislaufs. Hervorgerufen wird er letztlich von so genannten gramnegativen Bakterien, die sich durch einen besonderen Aufbau ihrer Außenhülle auszeichnen. Wenn diese Mikroorganismen absterben – etwa in Folge einer Behandlung mit Antibiotika –, wird Lipid A frei. Dieses Molekül ist ein Glykolipid und löst im Blut eine katastrophale Entzündungsreaktion aus, weil es das Immunsystem übermäßig anstachelt. Eine analoge Substanz, welche die Abwehrzellen nicht überreizt und vom echten Lipid A fern hält, könnte den Schock mindern oder ganz verhindern. Nach einigen Beobachtungen ist es sogar möglich, dass solche Analoga die Vermehrung der Bakterien und damit letztlich die Produktion von Lipid A unterdrücken.

Nahezu alle Infektionskrankheiten werden zwar von Mikroben, Pilzen oder Parasiten verursacht. Doch manche übertrag-

RANDI BEREZ

Ram Sasisekharan vor seiner ausgeklügelten Anlage zur Sequenzierung von Zuckern. Nachdem Enzyme eine komplexe Zuckerkette zerschnitten haben, sortiert ein moderner Hochdruck-Flüssigkeitschromatograf (links) die Bruchstücke. Diese gelangen getrennt in ein Massenspektrometer (Mitte), das ihre Bestandteile bestimmt. Aus den Ergebnissen beider Prozeduren ermitteln Computer schließlich die komplette Sequenz der Zuckereinheiten im Molekül.

Ausnahme der Gruppe, die eine Verbindung eingehen soll. Dieser erste Zucker darf dann mit einem zweiten reagieren, der ebenfalls weitgehend maskiert ist. Als Nächstes entblößen sie eine neue OH-Gruppe und wiederholen die Prozedur. Zucker für Zucker wächst so die Kette heran.

Auch wenn die Methode nicht so einfach ist wie bei der automatisierten Synthese von Protein- oder DNA-Abschnitten, funktioniert sie doch recht gut: Die meisten Verknüpfungen und Verzweigungen in Zuckerketten können damit sehr zuverlässig hergestellt werden. Die größten Zucker, die Seebergers Gruppe bislang konstruiert hat, umfassen zwölf Bausteine. Dazu braucht sie 16 Stunden. In diese Größenkategorie fällt schon eine erkleckliche Anzahl wichtiger Zuckerketten, darunter auch jene, in denen sich Zellen auf ihrer Außenseite unterscheiden. Noch größere Moleküle ließen sich dann durch Verknüpfen kleinerer in Modulbauweise herstellen.

Bei einer anderen Methode läuft die Synthese in einem einzigen Gefäß ab, in dem sich gleich von Anfang an alle Zutaten befinden. Dieses »Eintopf«-Verfahren erfordert sorgfältigere Planung, ist dann aber in der Ausführung einfacher. Die Abfolge der Schritte wird durch die Reaktionsfreudigkeit der jeweils unterschiedlich geschützten Zuckerbausteine vorab festgelegt. Die reaktivsten Moleküle bilden zuerst Bindungen aus, zum Schluss kommen die trägsten Zuckerbausteine. Anhand der Reihenfolge der Reaktionsstärken lässt sich also die Sequenz des zu fertigenden Oligosaccharids vorgeben.

Derzeit perfektionieren Forscher auch ihre Methoden, um mehr über die Aufgaben der Zucker im Organismus zu erfahren. Dazu verändern sie bei Tieren beispielsweise gentechnisch den biologischen Syntheseweg der Zuckerketten. Alternativ verabreichen sie den Tieren entweder anomale Einfachzucker, die Enzyme des Syntheseweges hemmen, oder Wirkstoffe, welche die Interaktionen zwischen normalen Zuckern und anderen Molekülen beeinträchtigen. Aus den auftretenden Veränderungen schließen die Forscher dann auf die Funktion des Zuckers.

»Früher galten Zucker als Ärgernis, weil Verfahren zu ihrer Erforschung rar waren«, sagt Sasisekharan. Inzwischen gelten sie als zukunftsträchtiges Feld.

baren Erkrankungen des Gehirns, wie die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit, gehen vermutlich auf falsch gefaltete Proteine – so genannte Prionen – zurück. Forschungsergebnisse von John Collinge vom St. Mary's Hospital in London deuten darauf hin, dass Prionen, die auch beim Rinderwahnsinn BSE vorkommen, wohl so hartnäckig dem Abbau durch Enzyme widerstehen, weil sie nicht richtig »glykolisiert« sind. Wenn einmal die genaue Funktion der Zuckerketten dabei geklärt ist, bieten sich vielleicht auch Ansätze, wie diese mysteriösen Infektionen zu bekämpfen wären.

Medikamente auf Zuckerbasis könnten auch gegen nicht infektiöse Erkrankungen eingesetzt werden, darunter solche, die wiederum mit übermäßigen Entzündungserscheinungen einhergehen. Wenn ein Mensch sich verletzt, fahren die Wandzellen der Blutgefäße große Mengen Proteine aus der Gruppe der Selektine als Angelhaken aus. Selektine gehen eine lockere Bindung mit Abwehrzellen ein, die im Blut zirkulieren. Diese gehören zu den weißen Blutkörperchen und tragen ein spezielles Kohlenhydrat namens Sialyl-Lewis x auf ihrer Oberfläche. Wie ein Tennisball, der auf einem Streifen Klettverschluss entlangrollt, holpern nun die weißen Blutkörperchen an der Innenwand des Blutgefäßes entlang. Dabei werden sie immer langsamer und können sich schließlich durch die Wand zwängen, um in das gefährdete Gewebe zu gelangen. Dieser an sich sinnvolle Mechanismus, der auch bei Infektionen greift, kann selbst zur Ursache von Krankheiten werden, wenn die Reaktion nicht mehr abklingt oder sogar überschießt. Darum entwickeln Forscher derzeit Substanzen, die den Kontakt zwischen Sialyl-Lewis x und Selektinen behindern. Sie versprechen sich davon neue entzündungshemmende Mittel (siehe Kasten Seite 49).

Auch im Kampf gegen Krebs verfolgen Wissenschaftler mehrere Strategien, die mit Zuckern zu tun haben. So tragen Krebszellen auf ihrer Oberfläche häufig unvollständige oder ungewöhnliche Zucker. Derartige Erkennungszeichen, integriert in therapeutische Impfstoffe, sollen das Immunsystem anregen, Krebszellen zu erkennen und zu zerstören.

Die Arbeitsgruppe von Sasisekharan am MIT stellte vor kurzem bei Experimenten an Mäusen fest, dass Heparansulfate – eine Zuckersorte, die auf gesunden wie auf entarteten Zellen vorkommt – das Wachstum eines Tumors beschleunigen oder verlangsamen können, je nachdem, wie zelluläre Enzyme diese Moleküle gespalten haben. Vielleicht ließe sich Krebs mit den bremsenden Zuckerfragmenten behan- ▷

Die Zukunft hat begonnen

Die Tabelle listet eine kleine Auswahl von neuen Medikamenten und Testkandidaten auf, deren Wirkung mit Zuckern in Zusammenhang steht. Einige der vorgestellten Substanzen sind so genannte Glykokonjugate – Verbindungen von Zuckern mit Peptiden (kurzen Aminosäureketten), Proteinen (lange Aminosäurenketten) oder Lipiden (Fetten). In klinischen Studien der Phase I wird die Unbedenklichkeit eines potenziellen Medikaments geprüft; in Phase II und III geht es um seine Wirksamkeit. Erst danach kann der Hersteller die Zulassung für sein Mittel beantragen.

vorhandenes oder potenzielles Medikament (Wirkstoff)	Beschreibung	Hersteller	Status
Cerezyme (Imiglucerase)	Enzym, das Glykolipide abbaut; gleicht den Enzymmangel aus, der für die Gaucher-Krankheit verantwortlich ist	Genzyme, Cambridge (Mass.); deutscher Vertrieb: Genzyme GmbH, Neu-Isenburg	seit 1998 in Deutschland zugelassen
verschiedene Produktnamen (Vancomycin)	Glykopeptid-Antibiotikum, das oft gegen antibiotikaresistente Erreger eingesetzt wird; hemmt die Bildung eines zuckerhaltigen Teils der bakteriellen Zellwand	verschiedene Anbieter	in Deutschland zugelassen
Targocid (Teicoplanin)	Glykopeptid-Antibiotikum aus einem bakteriellen Grundstoff, der chemisch verändert wird	Aventis Pharma, Frankfurt am Main	in Deutschland zugelassen
Zavesca (Miglustat)	Zucker-Imitat; hemmt die Synthese eines Glykolipids, das sich bei der Gaucher-Krankheit anhäuft	Oxford Glycosciences, Abingdon (England)	europäische Zulassung erhalten
GMK-Impfstoff	Impfstoff mit dem Glykolipid GM2; soll eine Immunantwort gegen Krebszellen auslösen, die GM2 auf ihrer Oberfläche tragen	Progenics Pharmaceuticals, Tarrytown (Bundesstaat New York)	Phase-III-Studie zur Therapie von Melanomen
Staphvax	Impfstoff mit einem bakteriellen Zucker, der an ein Protein gekoppelt ist; soll Staphylokokken-Infektionen im Krankenhausbereich verhindern	Nabi Biopharmaceuticals, Boca Raton (Florida)	Phase-III-Studie für Patienten mit schweren Nierenerkrankungen und begleitendem hohem Infektionsrisiko
Bimosiamose (TBC1269)	Zucker-Imitat; soll Selektine, zuckerbindende Proteine der Blutgefäßwand, daran hindern, Entzündungszellen ins Gewebe zu locken	Revotar Biopharmaceuticals AG, Henningsdorf, Brandenburg	Phase-II-Studien an Patienten mit Asthma und Schuppenflechte
GCS-100	Zucker, der mit einem Protein auf Tumoren interferiert, das Zucker bindet	GlycoGenesys, Boston	Phase-II-Studien an Patienten mit Krebs der Bauchspeicheldrüse oder des Dick- und Enddarms
GD0039 (Swainsonin)	Zucker-Imitat; hemmt die Produktion von Kohlenhydraten, die bei der Aus-breitung von Krebs im Körper – bei der Metastasierung – bedeutsam sind	Glycodesign, Toronto (Kanada)	Phase-II-Studien an Patienten mit Nierenkrebs
PI-88	Zucker, der Wachstumsfaktoren für die Angiogenese – die Bildung neuer Blut-gefäße – hemmt; stört zugleich ein Enzym, das an der Metastasierung beteiligt ist	Progen, Darra (Australien)	Phase-II-Studie an Patienten mit Multiplem Myelom, einer Form von Leukämie; Phase-I/II-Studien bei Patienten mit Melanom
UT231B	Zucker-Imitat; soll das Hepatitis-C-Virus daran hindern, Zellen zu befallen	United Therapeutics, Silver Spring (Maryland)	Phase-I-Studie abgeschlossen

deln. Möglicherweise könnten geeignete Substanzen die Krebszellen sogar dazu bringen, selbst die gewünschten Bruchstücke in größeren Mengen zu erzeugen.

Das gefährlichste am Krebs ist seine Neigung, Metastasen zu bilden: Bösartige Tumorzellen gelangen in den Blutkreislauf oder in die Lymphbahnen und wachsen woanders im Körper zu Tochtergeschwulsten heran. Eines der Moleküle, die der Wanderung Vorschub zu leisten scheinen, ist ein Zucker bindendes Protein namens Galectin-3. Es spielt zudem beim Aussprossen neuer Blutgefäße eine Rolle, die den wachsenden Tumor versorgen. Zu allem Übel hilft es den Krebszellen, Signale zur Selbstzerstörung zu missachten. Das Bostoner Biotechnologie-Unternehmen Glyco-Genesys testet derzeit ein Kohlenhydrat aus dem Pektin von Zitrusgewächsen an Krebspatienten. Die Substanz besetzt das Galectin-3.

Spenderschweine

Zellen stellen Glykoproteine oder Glykolipide in mehreren Schritten her, wobei diverse Enzyme Zuckergruppen hinzufügen oder auch aus einer Konstellation entfernen. Werden die »versüßten« Substanzen nicht mehr gebraucht, bauen andere Enzyme sie wieder ab. Das geschieht in eigenen Kammern der Zelle, den Lysosomen. Bei einer Reihe schwerer erblicher Störungen, zu denen die Gaucher-Krankheit und das Tay-Sachs-Syndrom gehören, kommt es zu einer schädlichen Anreicherung von Glykolipiden im Körper, weil das eine oder andere abbauende Enzym der Lysosomen ausgefallen ist.

Einige der Störungen lassen sich inzwischen mildern, indem man das betreffende Enzym zuführt. Vorher muss es mit einem Zucker versehen werden, der dafür sorgt, dass es zu den richtigen Zelltypen gelangt. Im Falle der Gaucher-Krankheit handelt es sich dabei um den Zucker Mannose. Er »adressiert« das Enzym an die großen Fresszellen des Immunsystems, die besonders empfindlich von dem Ausfall betroffen sind.

Diese Therapie ist jedoch teuer. Außerdem muss das modifizierte Enzym intravenös verabreicht werden, da der Magen-Darm-Trakt es verdauen würde. Ein weiteres Manko ist, dass Enzyme nicht aus dem Blut in das Hirn überwechseln können, wo gravierende Schäden an Nervenzellen drohen. Daher versuchen Wissenschaftler, die Anhäufung von Glykolipiden auf andere Weise zu begrenzen: indem sie deren Produktion am Ort der Herstellung drosseln. Bewerkstelligt wird dies hauptsächlich durch niedermolekulare Substanzen, darunter Zucker-Imitate, welche die Enzyme hemmen, die am Aufbau von Glykolipiden mitwirken. Ein Wirkstoff aus dieser Reihe, entwickelt von Oxford GlycoSciences in Abingdon in England, wird als Tablette eingenommen und hat jetzt die Zulassung bei der Gaucher-Krankheit erhalten.

Die Glykomik-Forschung könnte eines Tages sogar den Mangel an Spenderorganen lindern. Wissenschaftler suchen nach Möglichkeiten, ersatzweise Schweineorgane zu transplantieren, wenn keine geeigneten menschlichen Spenderorgane verfügbar sind. Ein erstes großes Hindernis für diese so genannte Xenotransplantation ist eine bestimmte Zuckergruppe auf der Innenwand von Blutgefäßen. Bei menschlichem Gewebe kommt sie nicht vor. Das Immunsystem des Empfängers reagiert praktisch sofort, binnen Minuten oder spätestens Stunden, mit heftiger Abwehr. Diese schnell auftretende Abstoßungsreaktion lässt sich kaum mit Medikamenten unterdrücken. Theoretisch gibt es mehrere Auswege. Zum Beispiel könnten geeignete Zucker-Imitate die schuldigen menschlichen Antikörper abfangen. Eine andere Idee: Schweine in ihrer Enzymausstattung gentechnisch zu verändern, damit sie den problematischen Zucker nicht mehr herstellen.

Medikamente auf Kohlenhydratbasis zu entwickeln ist allerdings mehr als eine Herausforderung – besonders wenn sie echte Zucker enthalten. Für den Verdauungstrakt sind Zucker nun mal für gewöhnlich Nahrung, weshalb Arzneistoffe eine entsprechende Schutzverpackung benötigen oder ins Blut injiziert werden müssen. Aber selbst dort sind sie nicht sicher. Enzyme im Blut können die Zucker ebenfalls abbauen. Zudem entfalten Kohlenhydrate ihre Wirkung oft dadurch, dass sie sich an viele Stellen locker anheften, statt mit wenigen Partnern feste Bindungen einzugehen. Daher muss man hohe Dosen verabreichen. Allerdings ist keine der Hürden unüberwindbar und das Ziel wirklich lohnend: eine völlig neue Dimension im Bereich therapeutischer Substanzen zu eröffnen. ◁

Thomas Maeder lebt als Wissenschaftsjournalist in Pennsylvania.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

Carbohydrates and Glycobiology. Spezial in: Science, Bd. 291, S. 2337, 2001.

The Bittersweet Promise of Glycobiology. Von Alan Dove in: Nature Biotechnology, Bd. 19, S. 913, Oktober 2001.

Emerging Themes in Medicinal Glycoscience. Von Kathryn M. Koeller und Chi-Huey Wong in: Nature Biotechnology, Bd. 18, S. 835, August 2000.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

FERNERKUNDUNG

Globales Bild der Schadstoffbelastung

Was sich bisher allenfalls mühsam aus Statistiken entnehmen ließ, zeigt der Blick aus dem All nun augenfällig: Westeuropa, Ostchina und der Osten der USA schleudern den meisten Dreck in die Luft. Durch die Kombination der Daten von vier Satellitensystemen von Nasa und Esa können Forscher des National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder (Colorado) die Konzentrationen von Kohlenmonoxid, Stickstoffdioxid und Aerosolen in der Atmosphäre jetzt direkt verfolgen und so erstmals Bilder der globalen Luftverschmutzung in Echtzeit erstellen. Danach erreicht etwa in Ostchina der Ausstoß an Stickstoffdioxid im Winter sein Maximum. Die Schadstoffe driften oft nach Osten zu Nachbarländern. So ließ sich verfolgen, wie Kohlenmonoxid, Stickstoffdioxid und Aerosole nach Japan und über den Nordpazifik verfrachtet wurden. Mit verbesserten Aufnahmesystemen soll es eines Tages gelingen, die Emissionen jedes einzelnen Landes aus dem All zu überwachen. *(National Center for Atmospheric Research, 10.12.2002)*

Die Satellitenaufnahme vom 16. 10. 2002 zeigt eine dicke Rauch- und Dunstglocke über Ostchina.

NCAR / NASA

BIOMECHANIK

Flexible Flatterei im Windkanal

Schmetterlinge können beim Fliegen zwischen sechs unterschiedlichen aerodynamischen Mechanismen wechseln – manchmal von einem Flügelschlag zum nächsten. Dies beobachteten Adrian Thomas und Robert Srygley von der Universität Oxford, als sie den »Admiral« *(Vanessa atalanta)* im Windkanal von einer künstlichen Blüte zur nächsten flattern ließen. Eingeleiteter Rauch machte die Luftströmungen um die Insektenflügel sichtbar, und eine Hochgeschwindigkeitskamera hielt den Bewegungsablauf in Zeitlupe fest. Für die rasante Beschleunigung oder für den Steigflug klappt der Admiral die Flügel einfach rasch auf und zu. Auf diese Weise erzeugt er an der Flügelspitze Wirbel, die ihm Auftrieb verleihen. Die aerodynamisch vorteilhafte Wirbelbildung kann er durch gleichzeitige Rotation des Flügels noch verstärken. Beim steten Vorwärtsflug dagegen sorgt der Schmetterling für eine laminare Luftströmung. Bei Bedarf kann er sich zusätzlichen Auftrieb verschaffen, indem er den Flügel beim Aufwärtsschlag durch den Wirbel bewegt, der sich beim Abschlag gebildet hat, und ihm dadurch Energie entzieht. *(Nature, 12.12.2002, S. 660)*

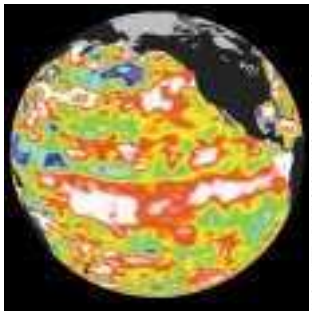
ROBERT SRYGLEY UND ADRIAN THOMAS, UNIVERSITÄT OXFORD

▲ Wie Rauchfäden zeigen, erzeugt der Schmetterling Wirbel hinter dem Flügel (oben). Hindurchziehen des Flügels durch den Wirbel verleiht zusätzlichen Auftrieb (unten).

ERDVERMESSUNG

Die Erde legt am Äquator zu

Der Globus ist keine ideale Kugel, sondern baucht sich am Äquator aus – unter anderem, weil die Fliehkraft durch die Erdrotation dort am stärksten wirkt. Allerdings heben sich seit dem Ende der letzten Eiszeit die von der Eislast befreiten hohen Breiten in Teilen Skandinaviens und Kanadas um bis zu einen Zentimeter pro Jahr. Dies hat den »Äquator-Bauch« über Jahrtausende kontinuierlich schrumpfen lassen. Nun jedoch scheint sich dieser Trend plötzlich umzukehren: Seit 1997 legt die Erde in der Mitte wieder zu. Wissenschaftler der Nasa und des belgischen königlichen Observatoriums machen hauptsächlich klimabedingte Veränderungen der Meeresströmungen dafür verantwortlich. Die Kombination von Messungen der Meereshöhe durch Nasa-Satelliten mit Ozean-Zirkulationsmodellen zeigt eine Verlagerung von Wassermassen vom Südpazifik in tropische Regionen. Verstärkt wird das Phänomen dadurch, dass sich das Abschmelzen subpolarer Gletscher rapide beschleunigt hat. Der vergangenen März gestartete Satellit Grace wird Veränderungen im Erdgravitationsfeld beobachten und so zweifelsfrei zeigen, ob der »Schwimmreifen« um die Erde weiter wächst. *(Nasa, 12.12.2002)*



NASA / HTTP://EARTHOBSERVATORY.NASA.GOV

▶ Vor allem in Äquatornähe liegt der Wasserstand bis zu 32 Zentimeter über dem Normalpegel (weiß).

TEILCHENPHYSIK

Auch Antineutrinos tun es

Neutrinos können ihre Identität wechseln, also zwischen unterschiedlichen Teilchentypen »oszillieren«. Daran besteht spätestens seit April vergangenen Jahres kaum noch ein Zweifel. Damals präsentierten Wissenschaftler erstmals direkte Hinweise darauf, dass sich Elektron-Neutrinos auf ihrem Flug von der Sonne zur Erde in Myon- und Tau-Neutrinos umwandeln. Jetzt belegte ein japanisch-amerikanisches Forscherteam diese Oszillation auch für die Antiteilchen von Elektron-Neutrinos, die aus japanischen Atomkraftwerken stammen. Deren Fluss ist noch zuverlässiger berechenbar als der von solaren Neutrinos. Danach sollte der unterirdische Kamland-Detektor in 145 Beobachtungstagen 86 solche Teilchen registrieren. Tatsächlich waren es aber nur 54. Einzige plausible Erklärung: Die Übrigen hatten sich in Tau- und Myon-Antineutrinos umgewandelt, auf die der Detektor nicht ansprach. Da das Ausmaß dieser Oszillation von der Masse der Teilchen abhängt, sind auch Kosmologen an den Resultaten interessiert; denn sie wüssten gerne, wie viel die im Universum äußerst zahlreichen Neutrinos zur Dunklen Materie beitragen.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY / HTTP://KAMLAND.LBL.GOV/

▶ Im unterirdischen Kamland-Detektor messen 2000 Fotomultiplier Spuren der Kollision von Elektron-Antineutrinos mit Protonen.

ASTRONOMIE

Schwarze Löcher im Doppelpack

Die Galaxie NGC 6240 weist im Radio- und Infrarotbereich ebenso wie im sichtbaren Spektrum zwei helle Kerne auf. Um festzustellen, welcher davon jenes äußerst massereiche Schwarze Loch enthält, das in den Zentren der meisten Sternsysteme vermutet wird, vermaß ein Forscherteam um Günther Hasinger und Stefanie Komossa vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching die 400 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie im Röntgenbereich. Überrascht stellten die Wissenschaftler fest, dass auch bei diesen hohen Energien beide Kerne strahlen. Demnach beherbergen beide aktive Schwarze Löcher – eine einmalige Konstellation. Vermutlich entstand die schmetterlingsförmige Galaxie aus der Kollision zweier Vorgänger, die je ein eigenes Schwarzes Loch mitbrachten. In einigen hundert Millionen Jahren werden die noch 3000 Lichtjahre voneinander entfernten Schwerkraftzentren miteinander verschmelzen und dabei einen gewaltigen Ausbruch von Gravitationswellen auslösen.

MPI FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK, GARCHING

▶ Das ungewöhnliche Paar Schwarzer Löcher verrät sich durch hochenergetische Röntgenstrahlung.

ARCHÄOLOGIE

Sprechblase mit ältesten Schriftzeichen

Auf dem faustgroßen Rollsiegel befindet sich ein Vogel mit Sprechblase. Die Zeichen darin gehören nach Überzeugung der Wissenschaftler um Mary Pohl von der Florida State University in Tallahassee zu einer frühen Schriftform. Das zylindrische Objekt wurde mit der Radiocarbon-Methode auf 650 v. Chr. datiert und dem Volk der Olmeken zugeordnet, das schon vor mehr als 3000 Jahren an der Ostküste Mexikos lebte. Die Grabungen in der Nähe der mexikanischen Stadt Tabasco förderten zudem Bruchstücke einer Jadescheibe zu Tage, auf denen ähnliche Zeichen zu finden sind. Diese bislang ältesten Schriftfunde Mittelamerikas deuten darauf hin, dass dort schon viel früher geschrieben wurde als bisher angenommen. Die Olmeken gelten schon länger als Begründer der Kultur Mittelamerikas. Als Erfinder der dortigen Schrift würden sie die Zapoteken ablösen, deren erste Schriftzeichen 300 v. Chr. entstanden sind. *(Science, 2.12.2002, S. 298)*

MARY POHL

▶ Auf diesem Rollsiegel der Olmeken stehen die bisher ältesten Schriftzeichen aus Mittelamerika.

Korallengärten in kalten Tiefen

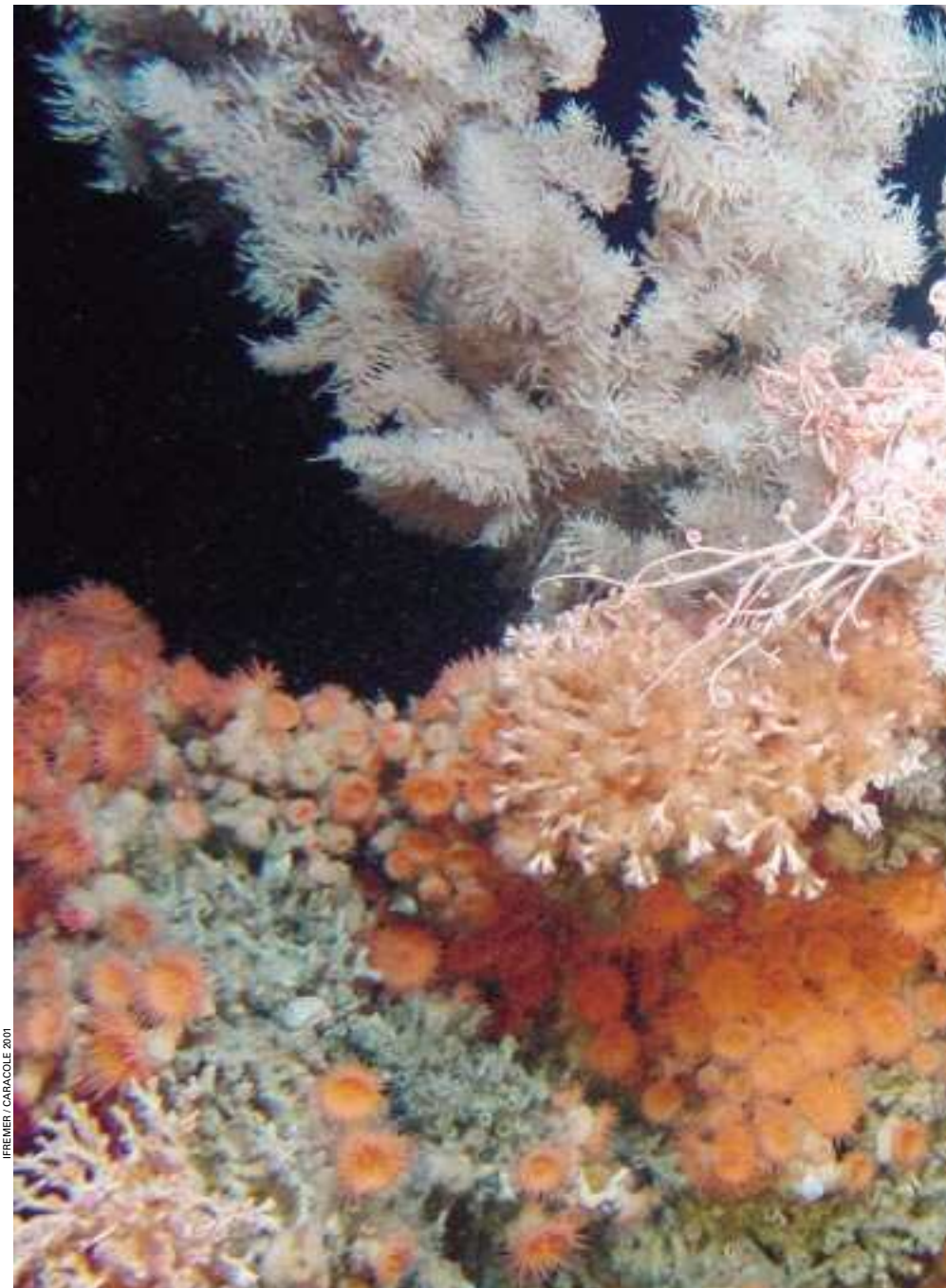
Die kaum erforschten riesigen Korallenriffe in den tiefen Schelfmeeren und an den Kontinentalrändern sind für die Fischbestände der Meere unersetzlich. Befunde internationaler Studien sollen ihre Zerstörung aufhalten helfen.

Von André Freiwald

Als in 250 Meter Tiefe die Scheinwerfer des Tauchbootes »Jago« aufleuchten, bietet sich uns ein atemberaubendes Bild: Korallenstöcke in hellen Farben und vielen Formen, dazwischen Seeigel und Schwämme in kräftigen Tönen, Jungfische, die zwischen den Korallen Deckung suchen, Käferschnecken, die Schwämme anknabbern, winzige Krebse und massenhaft tierische Planktonorganismen.

Hier unten am Sula-Rücken vor Mittelnorwegen, achtzig Kilometer vor der Küste Trondheims, ist die Strömung phasenweise unerwartet stark. Als Pilot muss Jürgen Schauer vom Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie in Seewiesen all seine Erfahrung aufwenden, um unser Gefährt ganz dicht an die winzigen Blumentiere heranzusteuern, ohne sie zu beschädigen. Bei dieser meiner ersten Tauchfahrt zum Sula-Riff im Jahr 1997 möchte ich vorsichtig Proben von der Korallenbank und ihren Bewohnern einsammeln. Vor allem aber will ich das Verhalten der Korallenpolypen beobachten und filmen.

Naturforscher wussten wohl schon vor Jahrhunderten, dass vielerorts vor den Küsten Skandinaviens, Großbritanniens und der Iberischen Halbinsel Korallen vorkom-



IFREMER / CARACOLE 2001

Ein Gorgonenhaupt, ein Schlangenstern, fängt in 900 Meter Tiefe im Rockal-Trog Nahrung über einem *Lophelia*-Stock, den eine weiße Oktokoralle umwächst. An abgestorbenen *Lophelia*-Korallen leben Seeanemonen.

men. Bereits der schwedische Wissenschaftler Carl von Linné (1707–1778) beschrieb die verbreitete Tiefwasserkorallenart *Lophelia pertusa*. Die Kenntnisse stammten sicherlich ursprünglich von Fischern. Wo es im Nordatlantik Korallen – Blumentiere – gab, da lohnte der Fang.

Doch erst in den letzten Jahrzehnten entpuppten sich die reichen Fischgründe nicht selten als große Korallenbänke, als die Bodenfischerei immer tiefere Zonen der Schelfmeere erschloss und andere Rohstoffindustrien, etwa Erdölunternehmen, an die Kontinentalhänge vordrangen. Die riesigen Ausmaße und den hohen ökologischen Wert dieser Tiefwasserriffe erkannte die Forschung vielerorts erst in den letzten Jahren. Noch immer ist in Lehrbüchern zu lesen, dass große Korallenriffe nur in der obersten, lichtdurchfluteten Zone warmer Meere entstehen. Nun sind Korallen an sich prädestiniert, Nährstoffe und Planktonorganismen aus dem Wasser aufzunehmen. An beidem mangelt es in den Meeresgebieten von tropischen Flachwasserriffen. Jene Korallen nehmen aber Mikroalgen in ihr Gewebe auf, wo diese wie in einem Kohlendioxid-Treibhaus gedeihen. Die Korallenpolypen beziehen in dieser Symbiose von den Photosynthese treibenden Algen Nährstoffe und versorgen die Algen ihrerseits mit Stoffwechselprodukten.

Tiefwasserkorallen wie *Lophelia* beherbergen keine symbiontischen Algen. Diese könnten in der Dunkelheit großer Tiefen ohnehin nicht existieren. Darum hielten Biologen und Geologen Tiefwasserkorallen bisher für eine Kuriosität. Sie glaubten, Korallen würden in kalten, lichtlosen Meeresgebieten allenfalls kümmerlich wachsen und schon gar nicht Riffe aufbauen.

IFREMER / CARACOLE 2001

Die Forschungen der letzten Jahre erwiesen das Gegenteil. Riffbildende Tiefwasserkorallen wachsen selbst hoch im Norden ähnlich rasch wie tropische Flachwasserarten. Ein Rätsel war nun, woher sie in dieser Umwelt die Energie dafür nehmen, also wie sie sich ernähren – ob die kleinen Korallenpolypen zum Beispiel winzige Tiere fressen. Damit zusammen hängt die Frage, woher das unerwartet reiche Nährstoffangebot in diesen Regionen letztlich stammt.

Die Kontinentalränder und die tieferen Zonen der Schelfmeere, welche die Landmassen der Kontinente säumen, sind fast noch weniger erforscht als die eigentliche Tiefsee. Erst vor gut zehn Jahren begannen Meeresforscher die dortigen Korallenvorkommen konsequent zu erfassen und zu untersuchen. Immer wieder überraschten die Ausmaße der Korallenbänke und deren Artenvielfalt. Genauso erstaunt registrierten die Forscher die mannigfaltigen Formen der Riffe. Auch hatten sie am Meeresboden nicht derart starke Strömungen erwartet, die nach heutigen Erkenntnissen für diese Oasen der Tiefsee anscheinend schon immer wichtig waren.

Vorstoß zum Kontinentalrand

Wie sich jetzt herausstellt, ist dieser exotische Lebensraum außerordentlich dynamisch – dadurch aber auch sehr empfindlich gegenüber menschlichem Zugriff. Moderne Fischfangmethoden haben bereits weite Gebiete verwüstet, und Ölfirmen interessieren sich zunehmend für die Kohlenwasserstofflagerstätten unter zahlreichen Riffgebieten an den Kontinentalrändern. Von den Korallenbänken vor Norwegens Küsten, die insgesamt eine Fläche von schätzungsweise 1500 bis 2000 Quadratkilometern bedecken, ist bereits etwa ein Drittel unwiederbringlich zerstört. Außer Bodenschleppnetzen setzt die Fischerei heute auch Walzen ein. Diese werden über den Grund geschleift, um Fische aufzustören. Solche brachialen Methoden bedeuten für die fragilen Korallenstöcke ein Desaster. Ein wichtiges Ziel von Forschungsexpeditionen in den 1990er Jahren zum Sula-Riff und zu anderen Korallenbänken vor Europas Küsten war daher, auch diese Zerstörungen zu erfassen und die Verantwortlichen darauf aufmerksam zu machen.

Vielleicht eben noch rechtzeitig könnte es gelingen, mit politischen Maßnahmen die zunehmende Verwüstung der Tief- ▷

wasserkorallenriffe aufzuhalten. Als sich Ende der 1990er Jahre immer klarer abzeichnete, dass nur umfangreiche Forschungsprogramme die für politische Entscheidungen benötigten Daten zusammentragen können, startete die Europäische Union im Frühjahr 2000 in ihrem fünften Rahmenprogramm das internationale Forschungsprojekt ACES *(Atlantic Coral Ecosystem Study)*, das sie mit 2,3 Millionen Euro fördert. Daran beteiligen sich zehn Wissenschaftlerteams aus fünf europäischen Staaten. Außer Deutschland sind dies Irland, die Niederlande, Großbritannien und Schweden.

ACES erfasst Korallenvorkommen im östlichen Nordatlantik von Gibraltar bis Nordnorwegen. Es untersucht zudem deren jeweilige Entstehungsgeschichte sowie die Besonderheiten der einzelnen Gebiete. Anhand solcher Befunde erstellen wir für die Anrainerstaaten Empfehlungen zur nachhaltigen Nutzung dieser Ökosysteme. Die Staaten können damit dann Regelwerke zum Schutz der Tiefwasserkorallen erarbeiten. Erste Erfolge, der bisher willkürlichen Nutzung, ja Ausbeutung der wertvollen Meeresgebiete gegenzusteuern, lassen sich bereits verbuchen.

Der Sula-Rücken auf dem Trondheim-Schelf gehört zu den imposantesten Korallenriffgebieten im Nordostatlantik. Die dortige Riffprovinz haben Wissenschaftler vor gut zehn Jahren entdeckt, aber ihre Ausmaße wurden erst in den letzten Jahren klar. Imposante, erstaunlich mannigfaltige Vorkommen von Tiefwasserkorallen verteilen sich aber über die gesamte westliche Abbruchkante Europas und über die angrenzenden Schelfmeere, von Gibraltar bis zum Nordkap. Im Süden zieht sich dieser Gürtel bis weit über den afrikanischen Äquator hinaus. Selbst in den norwegischen Fjorden und vor der Westküste Schwedens im Skagerrak wachsen mancherorts Korallenbänke nicht selten in erstaunlich geringer Wassertiefe. Anscheinend säumen Tiefwasserkorallenriffe mehr oder weniger locker weltweit die Kontinentalränder. Nur sind sie vor Europas Küsten bisher am besten erfasst.

Das ACES-Projekt untersucht fünf der europäischen Verbreitungsgebiete intensiv. Neben dem Sula-Riff auf dem mittelnorwegischen Schelf sind dies Vorkommen im schwedischen Kosterfjord im Skagerrak, außerdem drei große Regionen weiter südlich dicht an Kontinentalabhängen: den Rockall-Trog mit der angrenzenden Porcupine-Bucht westlich der britischen Inseln sowie auf Höhe der Iberischen Halbinsel die Galizia-Bank. Ein paar Seemeilen westlich dieser Bank sank kürzlich der Tanker »Prestige«. Das ausgelaufene Öl schädigt nachhaltig die marinen Ökosysteme.

IFREMER / CARACOLE 2001

Fast wie im Schlaraffenland werden hier Tiefwasserkorallen von tierischem Plankton umschwemmt, das ihre Hauptnahrungsgrundlage darstellt.

Das norwegische Sula-Riffsystem dürfte zu den weltweit größten Kaltwasserriffen gehören. Es erstreckt sich in 250 bis 310 Meter Tiefe mehr als 13 Kilometer lang als 400 bis 600 Meter breites Band in nordost-südwestlicher Richtung. Dieses Korallengebiet setzt sich aus Dutzenden einzelner steiler lang gestreckter Riffketten und vielen einzeln stehenden Hügeln zusammen. Am dichtesten und höchsten stehen sie auf dem Scheitel des Sula-Rückens. Die höchsten Gipfel ragen vom Meeresboden 35 Meter auf. Im Mittel messen die Grate und Dome 10 bis 15 Meter Höhe.

Schon die ersten Echolot- und Sonaraufnahmen ließen eine auffallend klare Grenze zwischen Riff und umgebendem Meeresboden erkennen. Fotos und Proben, die versenkte automatische Stationen, Tauchroboter und schließlich bemannte Tauchgänge lieferten, zeigten dann genauer den Aufbau dieser norwegischen Korallenbänke und ihre Bewohner. Während es am Riff von Leben wimmelt, wirkt die Umgebung meistens recht karg. Nur vereinzelt sieht man dort etwa einen Schwamm, eine Seewalze oder sogar einen größeren Fisch, gelegentlich an einem Felsbrocken auch einmal eine Ansammlung von Borstenwürmern, Manteltieren und Seeanemonen.

Am Sula-Riff selbst haben Meeresforscher bisher Hunderte von Tierarten gefunden. Auch viele bekannte Speisefische wie Rotbarsch, Seelachs und Kabeljau laichen dort ab oder haben dort ihre Jagdgründe. Wenn die Hochseefischerei diese Ökosyste-

IN KÜRZE

▶ **Korallen oder Blumentiere:** Die weltweit fast 5000 Arten dieser festsitzenden Hohltiere mit nesselbewehrten Fangtentakeln bilden Kalkskelette. Bei vielen Arten entstehen aus Einzelindividuen (Polypen) Tierstöcke, doch nur ein Teil von ihnen vermag Riffe aufzubauen. Lediglich rund 120 Arten, darunter etwa dreißig stockbildende, leben nicht in Symbiose mit einzelligen Algen – zu ihnen gehören die Arten der Tiefwasserkorallen, die bis in 6000 Meter Wassertiefe verbreitet sind.

JAGO-TEAM, SEEWIESEN

Dach des Sula-Riffs in 248 Meter Tiefe

▶ Die bis zu einige hundert Meter tiefen Schelfmeere überspülen die **Kontinentalschelfe** (Festlandsockel) der Kontinente. Am **Kontinentalrand**, am Übergang zur Tiefsee, geht das Schelf mit einem scharfen Knick in den steilen Kontinentalabhang über.

me zerstört, vernichtet sie zugleich ihre eigenen wirtschaftlichen Ressourcen.

Insgesamt lassen sich an diesen Riffen fünf Lebenszonen unterscheiden, die jeweils eine deutlich andere Tierwelt mit typischer Artenzusammensetzung beherbergen. Die oberste, etwa eineinhalb Meter mächtige Schicht im Gipfelbereich und an den oberen Flanken der steilen Hügel beansprucht weitgehend die Steinkoralle *Lophelia pertusa*. Hauptsächlich diese meist weiße Koralle liefert auch das Riffgerüst. Zwei weitere Korallenarten tragen in geringerem Maße zum Riffwachstum bei. Auf den Kuppen und oberen Flanken wachsen die Korallenstöcke mit ihren Ablegern dicht bei dicht zu mehrere Meter großen halbkugelförmigen Gebilden heran. Dieses Areal bevorzugen etwa die Rotbarsche.

Pilze und Schwämme als Architekten

Von einigen Schwämmen, Muscheln und oft kräftig farbigen Oktokorallen abgesehen, finden sich hier verhältnismäßig wenige festsitzende Arten. *Lophelia* wehrt sich mit einem Schleimüberzug der noch lebenden Teile gegen neue Korallenbesiedlung und Fraßfeinde. Konkurrenz, fremde Arten, überhaupt Fremdkörper kalkt die Koralle regelrecht ein. Die Polypen dulden aber einen bis zu 25 Zentimeter langen räuberischen Borstenwurm, *Eunice*, der sie vor Fraßfeinden schützt und seinerseits eine härtere Wohnröhre erhält. Diese Symbiose trägt erheblich dazu bei, das gesamte Riffgerüst zu stabilisieren.

Schon in dieser Zone fressen Bohrpilze und Bohrschwämme das Kalkgerüst an. Schließlich sackt dadurch ein Korallenstock in der Mitte, seinem ältesten Teil, zusammen, während ein äußerer Ring noch weiter wächst. Solche Schwämme und andere Kalk verwertende Organismen sorgen dafür, dass ein Riff schon in seinem oberen Teil immer wieder umstrukturiert wird und so neue Lebensnischen entstehen – auch wortwörtlich als Höhlen und Ritzen.

Das vielfältigste Leben herrscht in der zweiten Zone, einer mehrere Meter hohen Schicht aus den Kalkgerüsten abgestorbener Korallenstöcke, die voller kleiner Hohlräume steckt. Auch hier siedelt vereinzelt *Lophelia*, wächst aber an den oft senkrechten Wänden nur zu kleinen, flachen Formen heran. Arten aus fast allen Gruppen wirbelloser Tiere finden hier Lebensgrund, Unterschlupf und Nahrung, darunter farbenprächtige Seeanemonen, vielerlei Muscheln und Schnecken, Armfüßer und Tintenfische wie auch Korallenarten, die keine Kolonien bilden. An Überhängen finden sich Ansammlungen großer Muscheln der Gattung *Acesta*, die sich vom Plankton ernähren. Eine wichtige Funktion als Weidegänger im Riff scheinen Krebse, Seesterne und Seeigel zu haben.

Weiter unten, in der dritten Zone, haben sich in das Korallengerüst bereits Schlamm, Sand und Tierskelettreste eingelagert. Dieser jahrtausendealte Abschnitt steht mit ebenfalls oft fast senkrechten Wänden bis zu 15 Meter hoch. Neben einzelnen kleinen Korallenstöcken bestimmen nun große Schwämme und Oktokorallenfächer das Bild. Auf den letzten Metern fällt das Riff immer flacher ab. Die vierte Zone bedeckt Korallenschutt. Darauf leben unter anderem große Krebse und Igelwürmer. Die unterste, nur noch wenig ansteigende Geröllzone am Fuß besiedeln vor allem Schwämme.

Die Korallenbestände des Porcupine-Beckens vor Irland bieten ein völlig anderes Bild. Dort wachsen die gleichen riffbildenden Korallenarten wie auf der Sula-Bank, in dem Fall allerdings in 600 bis 900 Meter Tiefe an den Rändern einer Senke nahe am Kontinentalrand. Dass in dem Meeresgebiet massenhaft Kaltwasserkorallen leben, wissen Forscher seit rund 130 Jahren. Doch erst Mitte der 1990er Jahre entdeckten sie die merkwürdigen Riesenhügel, auf denen diese Korallen wachsen. Seismische Messungen durch unser Schwester-EU-Projekt GEOMOUND, koordiniert von Jean-Pierre Henriet von der Universität Gent (Belgien), enthüllten, dass dort viele über hundert Meter hohe Kegel oder Dome, so genannte Mounds, die Topografie des Kontinentalrandes bestimmen. Ein Teil von ihnen ist bereits völlig von Sedimenten verschüttet, andere ragen weit über die Sedimente hinaus. ▷

IFREMR / CARACOLE 2001

JAGO-TEAM, SEEWIESEN

JAGO-TEAM, SEEWIESEN

JAGO-TEAM, SEEWIESEN

Viele festsitzende Tiere leben an den Korallengerüsten, die im Nordatlantik insbesondere die Tiefwasserkoralle *Lophelia* baut. Meist wachsen solche Arten an schon abgestorbenen Korallenstöcken, wie die beiden Seeanemonen in der nördlichen Porcupine-Senke vor Großbritannien in 700 Meter Tiefe (obere beide Bilder). Auch Oktokorallen siedeln häufig an solchen Stellen, wie diese Kolonie von *Anthothelia grandiflora*, die auf einem gelben Schwamm sitzt (drittes Bild von oben). *Lophelia* selbst (unteres Bild) beherrscht mit mehrere Meter großen Kolonien oft den Gipfelbereich der Riffe.

▷ Drei völlig verschieden wirkende Mound-Provinzen lassen sich im Porcupine-Becken unterscheiden. Am weitesten im Norden liegen die Magellan-Mounds. Bis auf wenige herausragende Kuppen, auf denen Korallen wachsen, sind sie fast alle ganz von Sedimenten bedeckt. Die höchsten von ihnen messen 90 Meter. Gegenüber den anderen beiden Provinzen zeichnen sich die hiesigen Gebilde durch ihre Vielfalt an Größen und Formen aus. Dicht südlich davon ragen die ein bis fünf Kilometer breiten Hovland-Mounds bis zu 150 Meter vom heutigen Meeresgrund auf. Auch ihre Basis versteckt sich im Sediment. Sie dürfte wohl nochmals 100 Meter tief sein. Diese Berge tragen besonders viele Korallenstöcke. Davon ein ganzes Stück weiter im Südosten am irischen Kontinentalhang liegen die Belgica-Mounds. Einzeln oder in Gruppen bilden sie bis zu 150 Meter hohe Kegel und lang gezogene Strukturen, die auf der Hangseite meist im Sediment stehen, auf der zur Tiefsee offenen Seite aber steile Wände bilden. Auch sie tragen gerüstbildende Korallen.

Im Sommer 2001 konnte die CARACOLE-Expedition unter Leitung von Karine Olu vom IFREMER-Forschungsinstitut bei Brest alle Mound-Provinzen erstmals zusammenhängend kartieren. Mit dem Tiefsee-Tauchroboter »Victor« vom Forschungsschiff »L'Atalante« gelangen metergenaue Vermessungen und gezielte Probennahmen, was das Wissen über diese spektakulären Korallenhügel nachhaltig vertiefte.

Diese Ökosysteme unterscheiden sich in vieler Hinsicht von den norwegischen

JAGO-TEAM, SEEWIESEN

Der Krebs *Munida* findet im Riffgerüst Unterschlupf. Auf der Sula-Bank kommt er sehr häufig vor. Auch eine lila Oktokoralle hat sich angesiedelt.

Tiefwasserriffen. Die Korallen bilden viel weniger mächtige, dafür aber flächendeckende Dickichte. Die Artenvielfalt an gerüstbildenden Korallen ist generell höher. Zudem trägt der bizarre, trichterförmige Kieselschwamm *Aphrocallistes* wesentlich zum Gerüst bei. Auffallend sind auch die vielen Seelilien und farbenfrohen Anemonen.

In mancher Hinsicht ähnelt die Umwelt der Porcupine-Korallen dennoch den Lebensbedingungen am Sula-Riff. Das betrifft unter anderem die Strömungen, die auch hier trotz der Tiefe bemerkenswert stark sind. Gleiches ist für andere Tiefwasserkorallengebiete typisch. Geschwindigkeiten von bis zu vierzig Zentimeter pro Sekunde wurden gemessen. Manche meiner Kollegen und ich vermuten einen Zusammenhang mit den Lebensansprüchen der Korallen.

IFREMER / CARACOLE 2001

Ein Schwarm Seelilien lebt auf einem Korallenmound 800 Meter tief im Rockall-Trog. Den Untergrund bilden teilweise schon abgestorbene *Lophelia*-Korallen.

Ein Aspekt scheint ihr hoher Nahrungsbedarf zu sein, der ihnen das starke Wachstum erlaubt. Bei meiner Tauchfahrt 1997 zum Sula-Riff beobachtete ich Korallenpolypen beim Fressen – die erste Beobachtung dieser Art. Bisher war unbekannt, ob *Lophelia*-Korallen kleine Tiere fangen oder lediglich Nährstoffe und totes Material aus dem Wasser fischen. An die Meeresoberfläche geholte Polypen wiesen stets einen leeren Magenraum auf. Doch nun konnte ich zuschauen – und mit einer Spezialkamera in zwei Zentimeter Entfernung filmen –, wie die einen halben Zentimeter großen Polypen mit ihren Fangtentakeln eifrig kleine Krebse fischten und sie rasch in ihr Inneres beförderten. Inzwischen kennen wir eine ganze Palette kleiner wirbelloser Tiere, die diese Koralle einfängt und frisst.

Wählerische Korallen

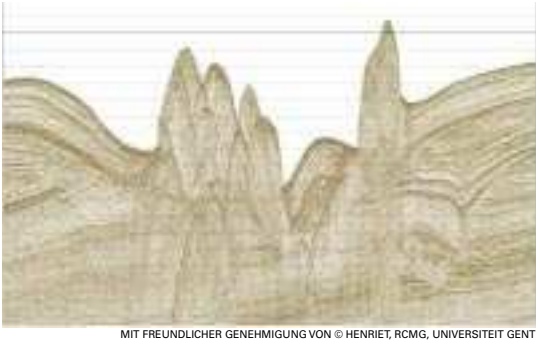
Besonders bemerkenswert erscheint, dass sich die Korallenvorkommen in jeder untersuchten Region auf ein relativ enges Tiefenintervall beschränken. Dieses Fenster liegt aber in jedem Gebiet anders. Manche norwegischen Bänke beginnen schon in weniger als hundert Meter Tiefe. Sie reichen oft bis zu 200 oder 300 Meter hinab. Andere vor Irland und Schottland beginnen erst 500 oder 600 Meter tief und enden teils bei 1000 Metern. Selbst noch tiefere Riffe sind bekannt. Anscheinend herrschen jeweils nur in dem besiedelten Intervall geeignete Lebensbedingungen für die Gerüstkorallen. Doch welche Faktoren können das sein?

Vergleicht man Eigenschaften der betreffenden Wassermassen wie Temperatur, Salz- oder Sauerstoffgehalt, so ergibt sich: Tiefwasserkorallen beanspruchen eine Temperatur zwischen vier und zwölf Grad Celsius und einen relativ hohen Salzgehalt. In Wasser mit hohem Salzgehalt ist mehr Kalziumkarbonat gelöst, das Korallen für ihre Kalkskelette verwerten.

Wichtig für den Standort sind auch die so genannten internen Wellen, Resonanzphänomene, die an den steilen Kontinentalrändern an den Grenzen unterschiedlicher Wassermassen auftreten. Sie konzentrieren Nährstoffe und absinkendes Plankton dort in bestimmten Tiefenschichten.

Mit Robotern und Tauchbooten zu den Riffen der Kontinentalränder

Die artenreichen Ökosysteme der tiefen Schelfmeere und Kontinentalabhänge erschließen sich erst jetzt mit den neuen technischen Ausrüstungen, die in Meerestiefen von einigen hundert bis über tausend Meter operieren können. Die Vermessung von Tiefwasserriffen erfolgt zunächst grob und dann in hoher Auflösung insbesondere durch tiefgeschleppte Sonarsysteme, die den Schall wenige Meter oberhalb der Riffe fächerförmig ausstrahlen. An interessanten Stellen werden Messsäulen abgesetzt, die monatelang vor Ort bleiben und verschiedenste physikalische Daten und Fotos von bewegten Objekten liefern. Mit Geräten aller Art bestückte Tauchroboter (*remote operated vehicles*, ROVs) arbeiten ähnlich selbsttätig wie in der Raumfahrt auf Planeten abgesetzte Sonden. Unter anderem liefern sie Proben von verschiedenen Zonen der Riffe. Den besten Aufschluss aber geben bemannte Tauchfahrten.



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON © HENRIET, RCMG, UNIVERSITEIT GENT

Dieser Mound in der Porcupine-Senke dürfte fast zwei Millionen Jahre alt sein. Die Profil-Ansicht entstand nach seismischen Messungen. Vielleicht bildeten Korallen schon die erste Basis.

BEIDE BILDER: ANDRÉ FREIWALD

Ferngesteuerte Roboter (oben) erforschen die Korallenriffe genauer. Unten die Sonaraufnahme einer Eisbergpflugmarke mit 40 Meter breitem und 18 Meter tiefem Graben am Sula-Riff.

Dies wiesen unsere Projektpartner Tjeerd van Weering vom Niederländischen Meeresforschungszentrum auf Texel und Martin White von der Universität Galway gemeinsam für den Rockall-Trog und die Porcupine-Senke nach.

Wahrscheinlich nützen die Wasserbewegungen den Korallen noch in anderer Hinsicht. Auffälligerweise stehen die meisten Korallenbänke des europäischen Atlantiks auf Erhebungen, an Steilhängen und anderen exponierten Stellen. Wohl wegen der starken Strömungen lagert sich auf solchen Flächen wenig Sediment ab. Um sich anzusiedeln, benötigen die Korallenlarven einen festen Untergrund. Heftige Strömungen halten ihnen geeignete Flächen frei. Sicher galt das auch in der Vergangenheit.

Am Sula-Riff lassen sich die teils noch hypothetischen Zusammenhänge gut aufzeigen. Nach Wachstumsberechnungen und radiometrischen Altersdatierungen begannen sich die dortigen Korallenbänke erst vor etwas über 8000 Jahren zu bilden, nur rund 4000 Jahre, nachdem sich die letzten Gletscher vom Sula-Rücken zurückgezogen hatten. Da sich ihre Geschichte recht gut zurückverfolgen lässt, könnten sie ein Modell dafür abgeben, wie Tiefwasserkorallenriffe entstehen.

Die ersten Korallenlarven auf dem Sula-Rücken scheinen sich an Geländemarken festgesetzt zu haben, welche riesige Eisberge hinterlassen hatten. Diese Eisberge waren zum Ende der letzten Vereisung vom skandinavischen Eispanzer abgebrochen. Auf dem Sula-Rücken stießen sie auf Grund und schliffen bis über zehn Meter tiefe und hundert Meter breite Rinnen ein (siehe Bild im Kasten oben). Die aufgeworfenen Ränder solcher Pflugmarken lassen sich an vielen Stellen noch heute auf Sonaraufnahmen gut erkennen. Die Eisberge schleppten auch große Felsbrocken mit, die nach ihrem Abschmelzen auf dem Grund liegen blieben und sich als Korallengrund eigneten. Vor wenig mehr als 7000 Jahren suchte eine gewaltige Umweltkatastrophe das Sula-Riff heim: Große Teile des nahe gelegenen Kontinentalrandes brachen in die Tiefsee ab. Fünfzehn Meter hohe Flutwellen trafen die Küsten. Das junge Riff wurde von Sedimentfahnen bedeckt und entging nur knapp seiner Vernichtung. ▷

IFREMER / CARACOLE 2001

Auch kleine Kolonien von *Madrepora* (unten) wachsen außer *Lophelia* (links) an dieser Stelle des Rockall-Trogs, 820 Meter tief. Am Stamm einer Oktokoralle (rechts) ranken Seeanemonen.

Woher bezogen die jungen Korallen ihre Nahrung? Manche Forscher vermuten, dass Energie liefernde Kohlenwasserstoffe, die an vielen Stellen aus dem Meeresboden austreten, für sie wichtig waren. Solche Sickerstellen und Schlote ernähren in der Tiefsee autarke Lebensgemeinschaften. Sie speisen Mikroorganismen, von denen sich dann Tiere ernähren. Im Bereich des Sula-Riffs tritt tatsächlich Methan aus dem Untergrund aus.

Es mag sein, dass die riffbildenden Tiefwasserkorallen noch heute in solche Nahrungsketten eingebunden sind. Ich vermute jedoch, dass der Großteil ihrer Nahrung letztlich vom Plankton der Meeresoberfläche stammt, das zum Grund absinkt und dort vom Wasser wieder aufgewühlt wird. Zumindest erleben die Korallenstöcke im Frühjahr während und nach der jährlichen Planktonblüte, wenn sich auch das tierische Plankton massenhaft vermehrt, einen kräftigen Wachstumsschub.

Die Mounds der Porcupine-Bucht reichen tiefer in die Vergangenheit zurück. Von den wiederholt vorrückenden Gletschern der Britischen Inseln wurden diese Riesenhügel nicht erfasst. Ob schon die ersten Stadien der heutigen Mounds von Korallen aufgebaut sind, ist noch völlig ungewiss. Ihr Alter dürfte nach seismischen Messungen ungefähr 1,8 bis 2,2 Millionen Jahre betragen.

Geologen am Geomar-Forschungszentrum in Kiel sowie dem neu geschaffenen Forschungszentrum für Ozeanränder in Bremen untersuchen gegenwärtig Schwerelot-Sedimentkerne aus den äußeren Schichten dieser Mounds, die bis in einige Meter Tiefe reichen. Erste Ergebnisse belegen, dass sich Phasen intensiven Korallenwuchses mit Zeiten erhöhten Sedimenteintrages ablösten, sodass sandwichartige Schichtungen entstanden. Diese Phasen korrelieren mit den Strömungen: Waren diese kräftig, lagerten sich wenig Sedimente ab und die Korallen wuchsen gut. In flauen Zeiten sammelten sich verstärkt Sedimente an, die Korallen wurden verschüttet und starben ab. Nach ersten Datierungen fallen die korallenreichen Phasen mit den Warmzeiten und die Sedimentphasen vorwiegend mit den Eiszeitperioden zusammen.

Auffallend oft fußen die heutigen Korallen auf einer Geröllschicht. Diese Steine müssen Eisberge bis dorthin verschleppt haben, die von den festländischen Eispanzern gekalbt waren. Offenbar bot das Geröll den Korallen ein günstiges Substrat zum Siedeln, besonders an exponierten, stark umströmten Lagen. Wie tief in die Wurzelbereiche der Mounds – zurück in die Zeit – die Sandwich-Lagen reichen, wissen wir zwar noch nicht. Doch die Forscher ahnen hier ein neues geologisches Archiv, das Auswirkungen globaler Umweltveränderungen auf Ökosysteme und Artenspektren konserviert. Diese Lebensräume fielen selbst in Kaltzeiten nicht trocken, wenn der Meeresspiegel 120 Meter tiefer lag als heute. Tiefwasserkorallenvorkommen überliefern darum Klimadaten wesentlich vollständiger als Riffe flacher Meere. Aus früheren Epochen der Erdgeschichte kennen Geologen große kalkhaltige Schlammhügel, wissen ihre Entstehung aber nicht zu deuten. Sie rätseln, ob solche Strukturen auch heute noch entstehen. Stellen die Porcupine-Mounds solche Schlammgebilde im Werden dar?

Tiefwasserkorallen gibt es, seit vor rund 240 Millionen Jahren die modernen Steinkorallen auftraten. Die ältesten Funde von *Lophelia* stammen von der Antarktischen Halbinsel. Sie sind über 50 Millionen Jahre alt, die bislang ältesten *Lophelia*-Bänke bei Neuseeland etwa 20 Millionen. Vor rund zwei Millionen Jahren verbreitete sich die Koralle im östlichen Mittelmeer. Fossilien aus der Porcupine-Senke datierten Mitarbeiter des Heidelberger Instituts für Umweltphysik auf 350 000 Jahre. Diese Abfolge könnte damit zusammenhängen, dass sich der Isthmus von Panama geschlossen hatte und der Golfstrom entstand. Dieser transportierte warme Wassermassen bis in die nördlichen hohen Breiten, löste wahrscheinlich die jüngsten Vereisungszyklen auf der nördlichen Halbkugel aus und beeinflusste auch die Meeresverbindung zum Mittelmeer. Molekularbiologen in Southampton entschlüsseln im Rahmen des ACES-Projekts unter anderem Verwandtschaftsverhältnisse, Reproduktion und Migrationswege der Korallen. Schon die ersten Ergebnisse überraschen, denn die genannten Faktoren hängen offenbar erstaunlich eng zusammen.

IFREMER / CARACOLE 2001

Der Gabeldorsch steht vor einer *Lophelia*-Kolonie, die in der nördlichen Porcupine-Senke wächst. Dort leben die Korallen in 800 Meter Tiefe.

P. MORTENSEN, HALIFAX

Diese Computer-Composit-Darstellung der Besiedlungszonen eines Tiefwasserriffs fertigte der Meeresbiologe Pål Mortensen vom Bedford Institute of Oceanography in Dartmouth (Kanada).

ANDRÉ FREIWALD

Geologen und Biologen müssen umlernen: Nicht nur unter tropischen Verhältnissen entstanden mächtige Kalkdome, sondern auch in lichtlosen kalten Meereszonen fast jeder geografischen Breite. Wie wenig Forscher über das Leben, das Vermehrungspotenzial und die Verbreitungswege der riffbildenden Tiefwasserkorallen wissen, bewies das allgemeine Erstaunen darüber, dass *Lophelia pertusa* sich bereits an Erdölplattformen in der Nordsee und im Atlantik ansiedelte. Auch die »Brent Spar« trug schon kleine Korallenstöcke. Dabei hat noch niemand die Larvenform dieser Korallen gesehen.

Zum Erstaunen der Forscher siedeln sich Tiefwasserkorallen schnell an künstlichen Objekten an, ob dies nun Taue, Kabel oder Bohrinseln sind.

Ein neues Fenster in die Erdgeschichte

Global betrachtet dürften die Kaltwasserriffe insgesamt mehr Fläche bedecken als ihre tropischen Pendants. Sie wachsen sogar am Äquator in großer Tiefe. Ihre Artenmannigfaltigkeit und ökologische Bedeutung stehen den tropischen Flachwasserriffen nicht nach. Zu beachten ist dabei, dass jedes Tiefwasser-Riffgebiet ganz eigene Strukturen hervorgebracht zu haben scheint. Wieweit die Riffe dennoch nach gemeinsamen Gesetzmäßigkeiten entstanden und auf welche Umweltbedingungen sie heute angewiesen sind, müssen zukünftige Studien herausfinden.

Auch wenn die Forschungen über die europäischen Korallenriffe erst begonnen haben, zeichnen sich doch schon viele revolutionäre Erkenntnisse ab, die eine Reihe wissenschaftlicher Disziplinen berühren. Unter anderem öffnen die Tiefwasserriffe ein neues Fenster in die Erdgeschichte. An ihnen können Geologen nachvollziehen, wie bisher rätselhafte fossile Riffkörper entstanden. Auch geben die Korallenbänke über frühere Meeresströmungen in größeren Wassertiefen Aufschluss. Sie zeigen zudem die Bedeutung von Lebensgemeinschaften der tiefen Schelfmeere für die Stabilisierung der Kontinentalränder. Völlig unbekannt ist, wie viel Kalk – in Form von Kalziumkarbonat – die Tiefwasserriffe weltweit binden und welchen Einfluss sie direkt und indirekt auf den Kohlenstoffkreislauf haben, indem sie anderen Organismen Lebensraum bieten und biogene Sedimente festhalten.

Das dringendste Ziel all dieser Forschungen ist aber, der kommerziellen Ausbeutung der nordatlantischen Riffe gegenzusteuern. Im Rahmen des ACES-Projekts arbeiten wir Vorgaben aus, mit denen eine nachhaltige und dennoch intensive Nutzung der Korallenbänke durchaus möglich sein sollte. Dazu erstellen wir einen digitalen Riffatlas, der die ersten genauen Karten dieser Ökosysteme zeigt. Er enthält nicht nur die Ausmaße und Besonderheiten der einzelnen Vorkommen, sondern markiert zugleich die geologischen und ökologischen Zonen – mit Angaben über die schon zerstörten und die besonders sensiblen Abschnitte. Parallel hierzu erarbeiten wir, wie Artenzusammensetzungen mit physikalischen Umweltbedingungen korrelieren. Dies soll dazu dienen, den Zustand solcher Ökosysteme zu erkennen sowie ihre Geschichte nachzuvollziehen.

Die norwegische Regierung hat auf den Medienaufruhr Ende der 1990er Jahre bereits reagiert und das Sula-Riff im Mai 2000 für die Bodenfischerei gesperrt und komplett unter Schutz gestellt. Auch die Rohstoffindustrien ändern ihre Vorgehensweise. An Tiefwasserriffen nehmen sie inzwischen Schrägbohrungen vor, welche die besonders labilen oberen Zonen schonen.

Sehr viele Fragen werden noch offen sein, wenn das ACES-Projekt in diesem Jahr, 2003, ausläuft. Obwohl es uns durch die Einbindung führender europäischer Forschungsinstitutionen auf dem Gebiet der Meeresforschung gelang, an den Kontinentalrändern geballt modernste Technologien einzusetzen, fehlt es uns vor allem an Langzeit-Beobachtungstechnologien. So brauchen wir Multifunktionsobservatorien ähnlich autonomen Weltraumsonden, die dieses faszinierende Ökosystem in seiner Dynamik erfassen können.

Solche Forschungsinitiativen werden gegenwärtig auf verschiedenen nationalen und vor allem internationalen Ebenen entwickelt. Um die Anfänge der riesigen Mounds vor Irland zu entschlüsseln, die etwa zeitgleich mit umwälzenden Veränderungen der ozeanografischen Zirkulation liegen, schlagen die Koordinatoren der am 5. Rahmenprogramm der EU beteiligten Kontinentalrandforscher eine Bohrung vor. Diese soll, falls sich das Projekt verwirklicht, im Rahmen des IODP *(Integrated Ocean Drilling Program)* erfolgen. Bereits jetzt zeichnet sich ab, das diese paneuropäische, weltweit umfassendste Initiative zur Erforschung der Geobiologie von Tiefwasserriffen ein neues interdisziplinäres Forschungsfeld aufgestoßen hat. ◁

André Freiwald koordiniert das ACES-Projekt der Europäischen Union. Im Frühjahr 2002 wechselte er von einer Professur für Invertebratenpaläontologie und Paläoklima an der Universität Tübingen auf einen Lehrstuhl am Institut für Paläontologie der Universität Erlangen.

Mitarbeit: **Margit Enders**. Die promovierte Biologin arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Starnberg.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

The Sula Reef Complex, Norwegian Shelf. Von André Freiwald et al. in: Facies, Bd. 47, S. 179, 2002.

Large Deep-Water Coral Banks in the Porcupine Basin, Southwest of Ireland. Von B. De Mol et al. in: Marine Geology, Bd. 188, S. 193, 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Gladiatoren: Gespenstische Räuber

Sie sehen aus wie eine Mischung aus Gespenst- und Fangschrecken. Die ersten Exemplare dieser bisher völlig unbekannten Insektengruppe fanden Forscher in Bernstein. Dann fingen sie einige Tiere lebend.

Von Oliver Zompro, Joachim Adis, Esther Moombolah-Goagoses und Eugène Marais

Wer wäre nicht ergriffen, wenn er einen neuen Käfer, einen neuen Schmetterling entdeckte? Als der schwedische Arzt und Naturforscher Carl von Linné (1707–1778) seine noch heute gültige Systematik der Organismen aufstellte, beschrieb er sogar ganze Tier- und Pflanzengruppen neu. Die Arten – die unterste Einheit – fasste er in Gattungen zusammen, diese in Familien, Familien wiederum in Ordnungen, Ordnungen in Klassen und Klassen in Stämme.

Heute noch eine ganze Gruppe neuer Organismen zu finden, ist ein seltenes Erlebnis. Besonders die höheren systematischen Kategorien scheinen so ziemlich alle längst entdeckt zu sein. Das glaubten Entomologen seit Jahrzehnten auch von den Insektenordnungen.

Nach Linné bilden die Insekten eine Klasse, Käfer oder Schmetterlinge Ordnungen. An heute lebenden Insektenarten gibt es zwar viel mehr unbekannte als bekannte: Etwa 1,2 Millionen sind erfasst; dagegen harren nach einigen Schätzungen fünf, nach anderen dreißig Millionen Arten noch ihrer Entdeckung. Doch zumindest die Ordnungen, in welche diese Arten sich aufgliedern, schienen seit etwa neunzig Jahren alle bekannt. Als bislang letzte beschrieben Entomologen im Jahr 1915 die Ordnung der Grillenschaben – wissenschaftlich Grylloblattodea genannt. Dies ist eine ganz kleine Gruppe von Hochgebirgsbewohnern, die in Europa nicht vorkommt.

Seitdem gilt, dass sich die Insekten in mehr als dreißig Ordnungen aufteilen. Die genaue Anzahl ist umstritten. Einige Entomologen trennen bestimmte Ordnungen nochmals auf. Eine neue Insektengruppe vom Rang einer Ordnung zu finden, erwartete allerdings niemand.

Doch dann brachten einige Bernsteinbrocken aus dem Baltikum mit winzigen Einschlüssen dieses Weltbild ins Wanken. Die Stücke fanden sich in einer Sammlung des Geologisch-Paläontologischen Instituts

THOMAS KUJAWSKI, ASA-MULTIMEDIA

Dass der Gladiator andere Insekten frisst, sieht man ihm an. Dieses Tier, eine *Mantophasma zephyra* (»Westwind-Gladiator«), lebt in Namibia.

BEIDE FOTOS: THOMAS KUJAWSKI, ASA-MULTIMEDIA

und Museums der Universität Hamburg. Vor rund 45 Millionen Jahren hatte das Baumharz die wenige Millimeter großen Insektenlarven eingeschlossen. Einer der Autoren dieses Artikels (Oliver Zompro) erhielt diese Bernsteinstückchen 1999 als Studienmaterial für seine Doktorarbeit.

Die Einschlüsse verunsicherten ihn. In welche Insektenordnung gehörten diese Larven? Zompro vermochte sie nicht zuzuordnen. Ihre Merkmale passten in kein ihm bekanntes Schema. Handelte es sich hier vielleicht um eine seltene ausgestorbene Linie?

Im Juli 2001 zeigte ihm die Kuratorin Judith A. Marshall im Naturgeschichtlichen Museum in London ein getrocknetes Insekt. Ein Sammler hatte dieses Tier, eindeutig ein erwachsenes Männchen, 1950 in Tansania gefunden. Niemandem war es gelungen, dieses Kerbtier zu bestimmen. Mit einigen Fotos von dem seltsamen Insekt kehrte Zompro nach Deutschland zurück.

Nur wenige Tage darauf erhielt er mit der Post ein weiteres Bernsteinstück mit einem Insekteneinschluss. Gleich betrachtete Zompro die Inkluse aus der Privatsammlung von Friedrich Kernegger aus Hamburg unter dem Mikroskop. Bei dem Einschluss handelte es sich um ein erwachsenes Männchen. Aber dieses ähnelte verblüffend dem getrockneten Exemplar in dem Londoner Museum. Jetzt ahnte Zompro schon, dass er etwas Ungewöhnlichem auf der Spur war.

Er zeigte das neue Bernstein-Fossil seinem Doktorvater Joachim Adis. Der schlug ihm vor, die Museen Europas nach ähnlichen Insekten zu durchforsten. Das tat Zompro, aber zunächst ohne jeden Erfolg. Doch dann hielt das Museum für Naturkunde in Berlin die Belohnung bereit: Ein Fläschchen mit Alkohol enthielt ein 26 Millimeter großes erwachsenes Insektenweibchen, das frappant zu dem Männchen im Bernstein zu passen schien. Das Weibchen stammte aus Namibia. Dort hatte es ein Sammler Anfang des 20. Jahrhunderts gefangen. ▷

Die ersten Exemplare der neuen Insektenordnung entdeckte Oliver Zompro in Bernsteinstücken. Vor rund 45 Millionen Jahren hatte das Baumharz diese Tiere eingeschlossen. Seitdem entwickelten sich jene Insekten weiter. Heutige Arten besitzen schlankere Vorderbeine und einen stärker gerundeten Kopf. Bei dem hier in zwei Ansichten abgebildeten Fossil mit dem großen dreieckigen Kopf handelt es sich um ein erwachsenes männliches Tier.

▷ Unsere Begeisterung lässt sich erahnen. Sie stieg noch, als wir (Zompro und Adis) die beiden letzten Exemplare – das eine viele Millionen Jahre alt, das andere aus heutiger Zeit – gemeinsam genauestens untersuchten und ihre Merkmale verglichen. Offenbar waren diese Insekten der Wissenschaft bisher entgangen.

Gespenstische Fangschrecken oder Fleisch fressende Grashüpfer?

Die Tiere wirken wie eine Mischung mehrerer bekannter Ordnungen. Auf den ersten Blick ähneln sie den Heuschrecken, denn sie besitzen ähnlich kräftige lange Hinterbeine. Doch viele Heuschrecken tragen als geschlechtsreife Tiere Flügel. Diese fehlten unseren Studienobjekten. Außerdem saßen am vordersten Beinpaar der Exemplare aus dem letzten Jahrhundert auffällige Stacheln. Das wiederum erinnert an Fangschrecken, auch Gottesanbeterinnen genannt, eine andere Insektenordnung, die auch in Süddeutschland vorkommt. Eine Gottesanbeterin ergreift mit ihren Vorderbeinen Insekten, auf die sie wie in Bethaltung lauert. Kräftige lange Hinterbeine besitzt sie allerdings nicht.

Der Kopf der neuen Insekten passt zu keiner der beiden Ordnungen. Und ihre gestreckte Körperform ähnelt von oben eher der von Stabschrecken, die auch in Südeuropa vorkommen und wie dünne Zweige aussehen. Diese gehören zur Ordnung der Gespenstschrecken, meist tropischen, bestens getarnten Arten. Darunter sind etwa die Wandelnden Blätter. Bei den neu entdeckten Exemplaren war das zweite Körpersegment für eine Stabschrecke aber zu kurz. Außerdem ernähren sich Gespenstschrecken ausschließlich von Pflanzen. Unsere Studienobjekte hatten aber eindeutig Insekten gefressen, deren Reste sie noch in sich trugen.

An ihren inneren Organen entdeckten unsere Kollegen Klaus-Dieter Klass vom Museum für Tierkunde in Dresden und Niels P. Kristensen vom Zoologischen Museum in Kopenhagen, wo Klass damals arbeitete, noch mehr anatomische Besonderheiten. Alle diese Befunde zusammengenommen zeigten ganz klar, dass sich die neuen Insekten in keine der herkömmlichen Ordnungen einfügen ließen. Offenbar stellten sie Vertreter einer eigenen Einheit dar, die gleichrangig mit Libellen, Käfern oder Schmetterlingen war.

Die neue Ordnung erhielt die Bezeichnung Mantophasmatodea, in Anlehnung an die wissenschaftlichen Namen für Fang- und für Gespenstschrecken. Salopp nennen wir die Tiere allerdings Gladiatoren – wegen ihrer imposanten Erscheinung und der helmbewehrten Larven (siehe Bild Seite 67 oben).

Offen ist noch, mit welchen anderen Insektenordnungen die neue Gruppe näher verwandt ist. Man darf aber annehmen, dass die Gladiatoren in die Nähe der

Weder Stabschrecke noch Gottesanbeterin

Unverkennbar ein Gladiator

Ein einzigartiger Merkmalsmix kennzeichnet die neue Insektenordnung. Ähnlich wie Fangschrecken tragen Gladiatoren an den Vorderbeinen Stacheln. Damit halten sie gefangene Beutetiere fest, die sie lebend fressen. Von ihrer Ernährungsweise zeugen auch die starken Zangen der Mundwerkzeuge. Das unterscheidet sie von den rein Pflanzen fressenden Feldheuschrecken und Stabschrecken. Mit dem hinteren Beinpaar können Gladiatoren springen. Diese Beine sind allerdings nicht so kräftig wie die von Feldheuschrecken. Im Gegensatz zu Gottesanbeterinnen und Feldheuschrecken, die oft zwei Flügelpaare tragen, haben Gladiatoren allerdings keine Flügel. An Stabschrecken wiederum erinnert der lang gestreckte Körper. Doch bei den Stabschrecken ist das zweite Segment des Thorax (sozusagen des Brustbereichs) besonders lang gestreckt, und das dritte Segment verschmilzt mit dem Hinterleib. Beide Merkmale weisen Gladiatoren nicht auf. Eine Besonderheit, die für die neue Ordnung typisch zu sein scheint, ist ein hochstehender Anhang am letzten Fußglied.

Von der Seite gesehen fallen bei *Mantophasma zephyra* die Fresswerkzeuge auf.

Nur auf den ersten Blick wirkt das Tier wie eine Stabschrecke.

BEIDE FOTOS: THOMAS KUJAWSKI, ASA-MULTIMEDIA

THOMAS KUJAWSKI, ASA-MULTIMEDIA

Den Namen Gladiator erhielten die neuen Insekten wegen des helmartigen Panzers, den ihre Larven tragen. Bei dieser Art aus Namibia verstecken sich die Larven eigentlich an und unter Felsen, die sie auch vor der Sonne schützen. Die jungen Tiere sind im Gestein vorzüglich getarnt.

Fang- und der Stabschrecken gehören, also dass sie mit beiden gemeinsame Vorfahren haben. Das müssen jedoch weitere, bereits laufende Studien klären.

Natürlich interessierte uns vor allem brennend, ob heute noch irgendwo Gladiatoren leben. In der Hoffnung, dass die letzten von ihnen nicht im vergangenen Jahrhundert ausgestorben sind, verschickte Adis Fotos dieser Insekten an Kollegen in der ganzen Welt.

Wir hatten Glück. An der Universität Leeds (England) fanden Wissenschaftler noch ziemlich frische Präparate eines geschlechtsreifen Gladiators und zweier Larven. Erst zwischen 1998 und 2000 hatten sie diese Tiere am Brandberg in Namibia 300 Kilometer nordwestlich von Windhoek gesammelt. Aus Namibia selbst meldete sich Eugène Marais, einer der Koautoren dieses Artikels. Er konnte aus seinem Land gleich zwei Exemplare vorweisen, auf welche die Beschreibung ebenfalls gut passte. Eines hatte er 1990 persönlich gefangen, das andere hatte der Student Martin Wittneben gerade erst im Jahr 2001 gesammelt.

Als Marais kurz darauf nach Deutschland kam, planten wir gemeinsam eine ▷

Trivialname	wissenschaftlicher Name
Zweiflügler	Diptera
Fächerflügler	Strepsiptera
Schnabelfliegen	Mecoptera
Flöhe	Siphonaptera
Schmetterlinge	Lepidoptera
Köcherfliegen	Trichoptera
Hautflügler (Ameisen, Wespen, Bienen)	Hymenoptera
Käfer	Coleoptera
Echte Netzflügler	Neuroptera (Planipennia)
Schlammflügler	Megaloptera
Kamelhalsfliegen	Raphidioptera
Rinden- und Staubläuse	Psocoptera
Tierläuse	Phthiraptera
Wanzen, Zikaden	Heteroptera
Blasenfüße, Fransenflügler	Thysanoptera
Steinfliegen	Plecoptera
Tarsenspinner	Embioptera
Bodenläuse	Zoraptera
Schaben	Blattodea
Fangschrecken	Mantodea
Gladiatoren	**Mantophasmatodea**
Termiten	Isoptera
Ohrwürmer	Dermaptera
Grillenschaben	Grylloblattodea (Notoptera)
Gespenstschrecken	Phasmatodea
Heuschrecken	Orthoptera
Libellen	Odonata
Eintagsfliegen	Ephemeroptera
Silberfischchen	Zygentoma
Felsenspringer	Archaeognatha
Blattläuse	Homoptera

ALLE ABBILDUNGEN: JOHN MOORE

THOMAS KUJAWSKI, ASA-MULTIMEDIA

Die erste Etappe zum Brandberg in Namibia nordwestlich von Windhoek legten wir mit Lastwagen zurück. Dann brachte uns ein Hubschrauber auf ein Hochplateau. In dem Bergmassiv in der Namib, dem höchsten des Landes, und in Nachbarbergen fanden wir lebende Exemplare zweier Gladiatorenarten.

▷ größere Expedition nach Namibia, denn nun sahen wir Chancen, lebende Gladiatoren in ihrer natürlichen Umwelt zu Gesicht zu bekommen.

Am letzten Februartag 2002 machte sich ein zehnköpfiges Team von Wissenschaftlern aus fünf Ländern in die Namib-Wüste auf, darunter Zompro und Marais. Das Ziel war das höchste Bergmassiv des Landes, der über 2500 Meter hohe Brandberg. Die Einheimischen nennen den runden Inselberg aus Granit, der unvermittelt 1800 Meter aus der kahlen Hochebene der Provinz Erongo ragt, Dâures: Brennender Berg. Mehrere seltene Tierarten kommen nur hier vor. Darum streben Naturschützer an, das abgelegene Gebiet als Nationalpark ausweisen zu lassen. Man darf es nur mit Genehmigung betreten.

Überlebenskünstler in der Namib

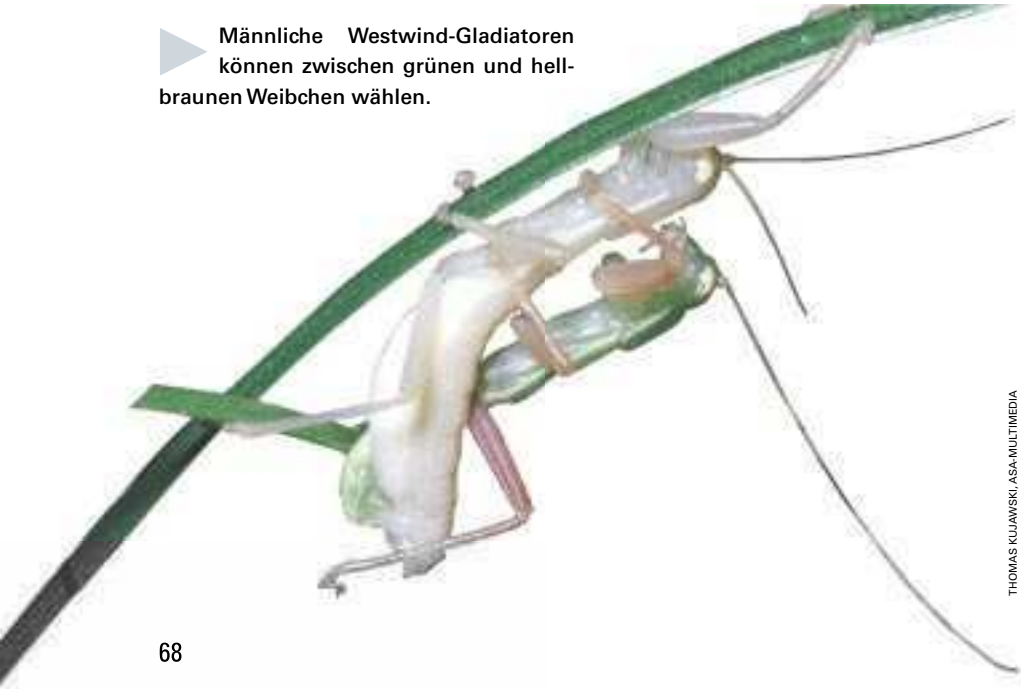
Für den ersten Tag auf dem Brandberg-Massiv hatten wir uns ein steiniges, von großen Felsblöcken eingefasstes weitläufiges Hochplateau vorgenommen, auf dem hohe Grashorste wachsen. Während wir das Gelände durchstreiften, schlugen wir auch mit Stöcken in diese Stauden, damit darin verborgene Insekten herausfielen. Nach einigen Stunden rief der namibische Taxonom John Irish mich (Zompro) heran. Er betrachtete eingehend etwas in seiner Hand. »Ich glaube, ich habe etwas für dich, Oliver«, meinte er.

Auf der Hand hielt er wirklich einen kleinen Gladiator im zweiten Larvalstadium. Ein anderer Teilnehmer stöberte am selben Abend noch vier Larven auf. Wir konnten unser Glück kaum fassen. Die meisten von uns sahen zum ersten Mal mit eigenen Augen lebende Exemplare dieser eigenartigen Insekten, die schon vor mindestens 45 Millionen Jahren existierten.

In dieser Nacht schlich ein Leopard um unser Camp. Doch manche von uns beeindruckte weder die Raubkatze noch der herrliche südliche Sternenhimmel. Uns gingen die Gladiatoren nicht aus dem Kopf. So viele Fragen taten sich auf. Was fressen diese Insekten? Wo finden sie in diesem trockenen Lebensraum Wasser? Wie überleben sie die verheerenden plötzlichen Überschwemmungen dieser Gegend? Auf welche Weise bestehen sie tägliche Temperaturschwankungen von 25 Grad Celsius und mehr? Um das und manches andere herauszufinden, würden wir Gladiatoren aller Entwicklungsstadien in ihrer natürlichen Umwelt und im Labor beobachten müssen. Zunächst wollten wir aber weitere Stellen des Brandbergs und anschließend einige andere Berge der Gegend nach diesen Insekten absuchen. Jeder Abstieg in tiefere Lagen erwies sich jedoch als äußerst beschwerlich und nicht selten als gefährlich und langwierig. Uns empfingen an den aufgeheizten steilen Hängen Temperaturen von 45 Grad Celsius. Zudem verwandelten Regengüsse in dieser Jahreszeit immer wieder Rinnsale plötzlich in breite reißende Wasser. Doch der Regen verzauberte auch die Landschaft. Die gedeckten Gelb-, Grau- und Brauntöne verschwanden. Überall schoss frisches Grün auf, und bald waren wir von einem Blütenmeer umgeben.

Die Strapazen lohnten. Es gelang uns, noch mehrere Gladiatoren zu fangen.

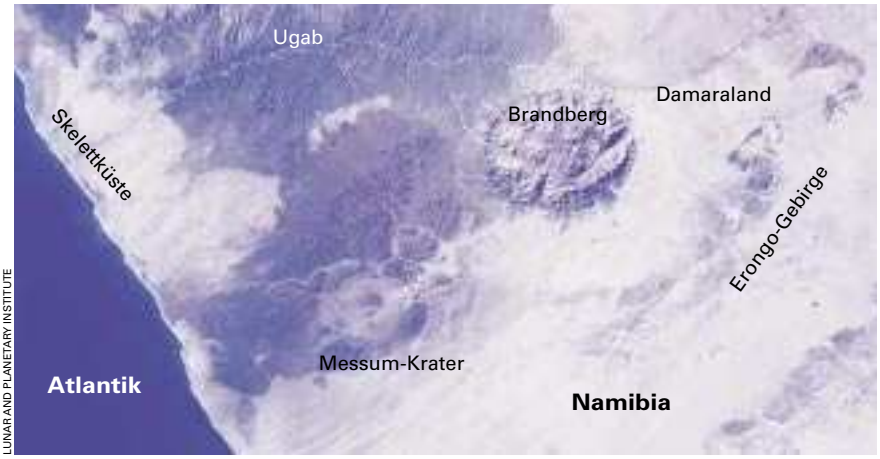
Mitte März gingen uns bei einem nächtlichen Streifzug im weiter östlich gelegenen Erongo-Gebirge Gladiatoren ins Netz, die zu einer anderen Art, *Mantophasma zephyra*, gehörten (siehe Bild links). Zählt man die beiden fossilen Arten im Bernstein dazu, kannten wir nun fünf Arten von Gladiatoren. Und am folgenden Tag gelang es Zompro zum ersten Mal, das Verhalten einiger Tiere in freier Natur zu beobachten. Insbesondere sah er, wie diese Insekten fressen.



THOMAS KUJAWSKI, ASA-MULTIMEDIA

Männliche Westwind-Gladiatoren können zwischen grünen und hellbraunen Weibchen wählen.

THOMAS KUJAWSKI, ASA-MULTIMEDIA



LUNAR AND PLANETARY INSTITUTE

Ein Dutzend lebender Gladiatoren nahmen wir zu weiteren Studien mit nach Deutschland. Auch wenn sich viele Fragen noch nicht beantworten lassen, können wir die Lebensweise dieser Insekten doch schon einigermaßen beschreiben.

Auf dem Brandberg in Namibia verbergen sich die Gladiatoren tagsüber in Grashorsten und unter Felshängen. Durch ihre Tarnfärbung verschmelzen sie optisch mit ihrer Umgebung. Erst bei Anbruch der Nacht verlassen sie ihre Verstecke.

Dann gehen sie auf Jagd. Sie lauern auf ihre Beute, vielerlei Insekten bis zu ihrer eigenen Größe, oder sie pirschen sich langsam an. In der afrikanischen Wildnis jagen sie unter anderem Nachtschmetterlinge und Schaben. In Gefangenschaft nehmen sie bevorzugt lebende Fliegen und Grillen, verschmähen aber auch tote Mehlwürmer nicht. Sogar verletzte Artgenossen sind vor ihnen nicht sicher.

Kleinere Beute packt ein Gladiator allein mit seinem starken vordersten Beinpaar. Für größere nimmt er, ähnlich wie räuberische Sägeschrecken (eine Familie der Heuschrecken), zusätzlich das mittlere Beinpaar zu Hilfe. Eine fette Fliege etwa tötet der Gladiator mit einem Nackenbiss und frisst dann zuerst den Kopf, danach den Rumpf. Nur Beine und Flügel lässt er übrig.

Im Freiland legen die Weibchen ihre Eier im Boden in einem Schaumkokon ab. Die Gladiator-Larve wächst sehr schnell. Sie häutet sich einige Male, bis sie ohne zwischengeschaltetes Puppenstadium – wie bei Gespenstschrecken und Heuschrecken und vielen anderen Insektenordnungen auch – das geschlechtsreife, erwachsene Stadium erreicht. Der gesamte Lebenszyklus scheint an die kurze Regenzeit angepasst zu sein, die auf dem Brandberg nur wenige Monate andauert.

Wohl kein Entomologe hatte noch mit einer neuen Insektenordnung gerechnet. Sofort durchforsteten Kollegen ihre Sammlungen nach Gladiatoren. Tatsächlich fanden sich in südafrikanischen Museen weitere 29 Exemplare. Mittlerweile entdeckten Wissenschaftler diese Insekten auch in der westlichen Kapprovinz, wo sie offenbar recht häufig vorkommen. Dort scheint es sich um andere Arten als in Namibia zu handeln, die allerdings noch nicht benannt sind.

Insgesamt haben Entomologen bisher eine ausgestorbene und drei lebende Arten der Gladiatoren beschrieben. Zwei von ihnen stammen aus Namibia, eine aus Tansania. Die fossile Art heißt *Raptophasma kerneggeri*. Die namibischen Arten bekamen die wissenschaftlichen Namen *Mantophasma zephyra* (»Westwind«) und *Praedatophasma maraisi*, die tansanische Art heißt *Mantophasma subsolana* (»Ostwind«). Bei Erscheinen dieses Artikels dürfte auch der Gladiator vom Brandberg beschrieben sein. Sicherlich wird die kommende Regenzeit weitere Entdeckungen bringen.

Forscherteams aus der ganzen Welt boten unverzüglich an, uns bei den Studien zu Verhalten, Lebenszyklus und Fortpflanzung der Gladiatoren zu unterstützen. Romano Dallai von der Universität Siena (Italien) analysiert Form und Struktur der Spermien. Das Erbgut untersuchen Arbeitsgruppen um Michael F. Whiting von der Brigham Young University (US-Bundesstaat Utah) und Roger T. Butlin von der Universität Leeds. Das alles wird hoffentlich bald ein klareres Bild liefern, wohin die Mantophasmatodea innerhalb der Insekten gehören.

Nachdenklich macht, dass die Gladiatoren jahrzehntelang unerkannt in Museen lagerten. Halten wissenschaftliche Sammlungen mehr solcher Überraschungen bereit? Auf einmal erscheint uns Insektenliebhabern die Natur wieder ein bisschen größer und unberührter zu sein als bislang angenommen. ◁

Oliver Zompro (Bild) ist Doktorand am Max-Planck-Institut für Limnologie in Plön. Sein Doktorvater **Joachim Adis** arbeitet dort in der Arbeitsgruppe Tropenökologie. Er hat eine Professur an der Universität Kiel und lehrt auch an mehreren Universitäten in Brasilien. **Esther Moombolah-Goagoses** ist Chefkuratorin am Nationalmuseum von Namibia in Windhoek. **Eugène Marais** ist Kurator der Namibischen Nationalen Insektensammlung in Windhoek.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

Mantophasmatodea: A New Insect Order with Extant Members in the Afrotropics. Von Klaus-Dieter Klass, Oliver Zompro, Niels P. Kristensen und Joachim Adis in: Science, Bd. 296, S. 1456, 24. Mai 2002.

A Review of the Order Mantophasmatodea (Insecta). Von O. Zompro, J. Adis und W. Weitschat in: Zoologischer Anzeiger, Bd. 241, S. 296, Okt. 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Electronic Cash

Von Stephan Fichtner

Kein Bargeld mehr und das Sonderangebot lockt? Kein Problem, entweder füllen Sie Ihre Börse am nächsten ec-Automaten mit Euro oder zahlen ohnehin bargeldlos an der Kasse. Die ec-Karte macht es möglich. Sie speichert neben anderen Daten Ihre persönliche Identifikationsnummer (PIN) auf einem Magnetstreifen auf der Rück- sowie in einem goldenen Chip auf der Vorderseite, ein Lesegerät fragt diese Daten ab und leitet eine Prüfung ein.

Ob Sie es glauben oder nicht, der Chip enthält einen winzigen Computer, und der verleiht Ihrer ec-Karte damit maschinelle Intelligenz, macht sie zur »Smart Card«. Diese Technik bietet Vorteile gegenüber dem Magnetstreifen, denn der lässt sich leichter manipulieren. Zur Identifikation wird die so gelesene PIN daher mit einem Referenzwert verglichen, der bei einem Zentralcomputer hinterlegt ist. Diese Systeme müssen also aus Sicherheitsgründen immer online sein, was die Kosten für die Betreiber enorm in die Höhe treibt. Die Chipkarte hingegen schützt Ihre PIN mittels komplexer Verschlüsselungsalgorithmen vor unbefugtem Zugriff und ist damit viel wirkungsvoller. Die Überprüfung des Benutzers kann also offline erfolgen. Nach wie vor fragt ein Großteil der Lesegeräte Magnetstreifen ab, der Chip wird nur als wieder aufladbare »elektronische Geldbörse« verwendet.

Die Idee, Datenspeicher und Rechnerlogik auf einem Siliziumplättchen von wenigen Quadratmillimetern Fläche in eine Identifikationskarte einzubauen, wurde um 1970 gleich mehrmals, nämlich in Deutschland, Japan und Frankreich geboren und zum Patent angemeldet. Der große Durchbruch kam 1984, als die französische und die deutsche Post jeweils entsprechend ausgerüstete Telefonkarten erfolgreich testeten. Hierzulande begann im gleichen Jahr auch ein Feldversuch für den Einsatz im Zahlungsverkehr. Doch erst 1996 legte der Zentrale Kreditausschuss (ZKA) die notwendigen Spezifikationen für die multifunktionale Eurocheque-Karte mit Chip verbindlich fest. Ein Jahr später führten viele Sparkassen und Banken sie ein. ◁

Stephan Fichtner ist Wissenschaftsjournalist und Redakteur von »Astronomie heute«.

THOMAS BRAUN, BASIEREND AUF EINER ILLUSTRATION VON ALAN DANIELS / QUELLE: GEMPLUS

Welchen Kartentyp haben Sie in der Brieftasche?

Kartentyp	Eigenschaften	Beispiel
Präge-Karte	nur geprägte Informationseinheiten	alte Kreditkarte
Magnetstreifen-Karte	Magnetstreifen auf der Rückseite, Ziffern vorne	Bankkarte
Speicherkarten	innerer elektronischer Speicher	vorbezahlte Telefonkarte
Smart Card	elektronischer Speicher und Prozessor	biometrische Identifikation
– mit Kontakt	elektrische Kontakte an der Oberfläche	
– berührungslos	Funkantenne integriert	

WUSSTEN SIE SCHON?

▶ Der preisgünstige und robuste Kunststoff **Polyvinylchlorid** (PVC) war die Grundlage des enormen Erfolgs von Kreditkarten. Die erste gab der Diners-Club 1950 für einen exklusiven Personenkreis heraus. Die Akzeptanz dieser Karten war bis zum Eintritt von VISA- und Mastercard in die Kartenszene auf Restaurants und Hotels der gehobenen Klasse beschränkt.

▶ Eine **Umfrage** des Mannheimer ipos-Instituts vom April 2002 zeigt: Etwa jeder zweite Deutsche befürwortet mittlerweile das »Electronic Banking«. Einige Experten fürchten um diese Akzeptanz, denn mit dem Wegfall der Euroscheck-Garantie hat die bekannte ec-Karte ihre Funktion als Garantiekarte verloren. Das einstmals europaweit einheitliche Design wird nun bankspezifischen Merkmalen Platz machen, das »ec« steht künftig für »electronic cash«, die Produktmarke »eurocheque« gibt es nicht mehr.

▶ Weltweit ist die Kreditkarte das meistgenutzte Zahlungsmittel beim **Online-Shopping**, ob Software-Download oder Bücherkauf. Doch Experten schätzen, dass der Kreditkartenbetrug im Netz etwa zehnmal höher ist als im konventionellen Handel. Nicht wenige Internetnutzer scheuen sich zudem nach wie vor, die Daten ihrer Kreditkarten über das Netz preiszugeben. Eine Alternative bieten wieder Smart Cards. Diese erfordern aber ein zusätzliches Lesegerät.

▶ **Smart Cards** erobern immer mehr Anwendungsfelder. Schon seit 1994 speichern Krankenkassenkarten all jene Informationen, die zuvor auf dem Krankenschein eingetragen waren. Ein weiteres Beispiel ist die so genannte SIM *(Subscriber Identity Module)*-Karte in Mobiltelefonen. Sie ermöglicht die Authentifizierung im digitalen europäischen Mobiltelefonnetz GSM *(Global System of Mobile Communications)*. Es dürfte nur eine Frage der Zeit sein, bis der Personalausweis ebenfalls mit einem Chip ausgestattet ist, der beispielsweise biometrische Daten wie Fingerabdrücke oder Irismuster speichert.

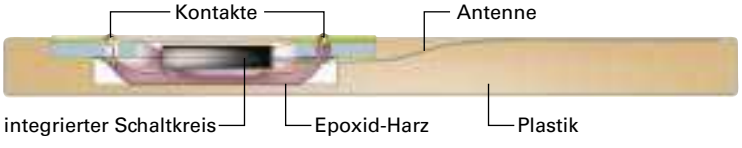
ILLUSTRATIONEN VON ALAN DANIELS / THOMAS BRAUN

Eine **Smart Card** besteht aus einem integrierten Schaltkreis samt Prozessor (CPU), einem veränderbaren (Ram), einem unveränderlichen (Rom) und einem programmierbaren Speicherelement (Eeprom).

Geprägte Karten speichern lediglich 16 Informationseinheiten. Die erste Zahl steht für den Herausgeber der Karte, Ziffern 2 bis 7 sind die Identifikationsnummern der Bank, 8 bis 15 stehen für Ihr Konto. Die letzte Zahl ist eine Kontrollziffer.

Magnetstreifen-Karten besitzen drei parallele Datenspuren. Dort finden beispielsweise achtzig Sechs-Bit-Buchstaben, vierzig Vier-Bit-Buchstaben und hundert Vier-Bit-Buchstaben Platz.

Der integrierte Schaltkreis (Chip) ist in Epoxid-Harz eingebettet. Drähte verbinden ihn mit den elektrischen Kontakten, die wiederum zu einem Kartenlesegerät oder zu einer Antenne führen, die per Funk mit einem Lesegerät verbunden ist. Das Lesegerät versorgt die Karte mit der notwendigen Spannung.



Als die Gallier Römer wurden

Mit militärischer Gewalt eroberte das römische Reich Gallien und mit Geschick romanisierte es die Kelten, bis nichts mehr an deren eigene Kultur erinnerte.

MUSÉE NATIONAL D'HISTOIRE ET D'ART, LUXEMBURG

Von Dirk Krausse

Wer in der Schule Französisch gelernt hat, tut sich später mit dem Italienischen oder Spanischen leicht. Dass sich die deutsche Sprache so stark von den als romanisch bezeichneten unterscheidet, ist leicht zu erklären: Im ersten Jahrhundert v. Chr. eroberte das römische Imperium ganz Westeuropa, von der Atlantikküste bis zum Rhein. Die Kultur der in Gallien – dem heutigen Frankreich, Belgien, der Westschweiz und Teilen Südwestdeutschlands – lebenden keltischen Völker verschwand in den folgenden 200 Jahren, wurde weitgehend von der römisch-italischen verdrängt; selbst die keltische Sprache verschwand und wurde durch die *lingua Latina* und die romanischen Tochtersprachen ersetzt.

Dieser als »Romanisierung« bezeichnete Prozess war weitaus radikaler als etwa die kulturelle Überfrachtung in den europäischen Kolonien des 19. Jahrhunderts oder die Amerikanisierung der Ureinwohner Nordamerikas. Archäologen verschiedener europäischer Einrichtungen tragen derzeit die Resultate ihrer Forschung zusammen, um diesen Vorgang besser zu verstehen. Wichtige neue Erkenntnisse lieferten insbesondere Ausgrabungen der letzten Jahre, die mit Förderung der Deutschen Forschungsgemeinschaft beiderseits des Mittelrheins, im antiken Siedlungsgebiet des keltischen Volks der Treverer und ihrer östlich lebenden germanischen Nachbarn durchgeführt wurden.

Das römische Imperium war keineswegs die erste Macht des Mittelmeerraumes, die Kontakt zu den »Barbaren« nördlich der Alpen aufnahm. Griechen und Etrusker lieferten im 6. und 5. Jahrhundert v. Chr. Wein und Trinkgeschirr von Italien und Südfrankreich aus in das heutige Württemberg oder Burgund. Zudem gelangten, wahrscheinlich als diplomatische Geschenke, kostbare Prunkgefäße, wie der berühmte Bronzekessel aus dem Fürstengrab von Hochdorf (siehe Seite 77) zu den Kelten. Welche Produkte im Gegenzug den Weg nach Süden nahmen, wissen wir leider noch nicht. Mit dem Handel einher ging auch ein Kulturimport. Die Kelten übernahmen Sitten, Techniken und Elemente der Kunst. Die in Südwestdeutschland und Ostfrankreich herrschenden Adligen pflegten um 500 v. Chr. Trinksitten, die dem griechisch-etruskischen Symposion ähnelten: Ausgestreckt auf griechischen Luxusklinen – bettenartigen Lagern aus reich mit Elfenbein- und Bernsteinintarsien verziertem Holz – trank man importierten Wein und einheimischen Met, die nach mediterranem Vorbild in Keramik- oder Metallgefäßen mit weiter Öffnung, so genannten Krateren, mit Wasser gemischt und aus Kannen ausgeschenkt wurden. Sie kopierten und modifizierten Schutzwaffen und beauftragten Steinmetze mit der Anfertigung lebensgroßer Statuen nach italischem Vorbild. An der oberen Donau entstand im 6. Jahrhundert v. Chr. sogar die erste Stadtanlage nördlich der Alpen. Wie die südlichen Städte wurde sie von einem Burgberg überragt, errichtet aus luftgetrockneten Lehmziegeln nach punisch-phönizischem oder etruskischem Vorbild (siehe Seite 76).

Diese Phase der Mediterranisierung fand um 400 v. Chr. ein Ende, als keltische Völkerschaften ihre Heimat nördlich der

Um 20 v. Chr. hatte manch ein keltischer Adliger bereits die Trinksitten der Besatzer übernommen. Diese in einem Adelsgrab im heutigen Luxemburg gefundenen Gefäße stammen überwiegend aus Italien. Die beiden Eimer entsprechen dagegen in Form und Verzierung noch der keltischen Tradition.

Alpen verließen und auf ihren Wanderungen als Eroberer bis ins Karpatenbecken, nach Griechenland, ja selbst bis nach Anatolien zogen. Auch nach Italien drangen sie vor, besiegten die Etrusker, eroberten 387 v. Chr. Rom und beherrschten für die folgenden 150 Jahre die Gebiete nördlich des Po, welche von den Römern deshalb als *Gallia Cisalpina* (das diesseits, also südlich der Alpen gelegene Gallien) bezeichnet wurden. Erst mit dem Erstarken Roms gerieten die Kelten im 3. Jahrhundert v. Chr. militärisch in die Defensive, 222 v. Chr. verloren sie den Kampf um die *Gallia Cisalpina*. Etwa hundert Jahre später gelangte der Süden Galliens bis zum Genfer See unter römische Herrschaft.

Als Gaius Iulius Caesar (100–44 v. Chr.) im Jahre 58 v. Chr. Statthalter dieser jungen römischen Provinz in Südfrankreich wurde, erstreckte sich nördlich davon ein riesiges, den Römern weitgehend unbekanntes Gebiet, das sie pauschal als *Gallia comata*, als das langhaarige, das barbarische Gallien bezeichneten. Tatsächlich handelte es sich bei den dort herrschenden kelti- ▷

KLAUS ROTHE / INSTITUT FÜR UR- UND FRÜHGESCHICHTE, UNIVERSITÄT KIEL

In den Jahrhunderten um Christi Geburt annektierte Rom weite Teile West- und Mitteleuropas. Die Karte zeigt die im Artikel erwähnten Fundstellen keltischer Grabanlagen und Siedlungen.

schen Völkern um hochkomplexe Gesellschaften, deren Kultur nicht zuletzt durch die jahrhundertelangen Kontakte mit Etruskern, Griechen und Italikern geprägt war. Diesen Stämmen konnten bis zu mehrere hunderttausend Menschen angehören. Die führenden Adligen und Fürsten kontrollierten urbane Zentren, lateinisch *oppida* genannt, in denen Handwerker und Händler lebten.

Gallien war vor der Okkupation also keineswegs unzivilisiert. Vielmehr lebten dort arbeitsteilige Gesellschaften mit Münzgeldwirtschaft und einem gut ausgebauten Straßennetz, zum Teil mit Brücken. Auch zu Wasser herrschte lebhafter Handelsverkehr. Allerdings war die *Gallia comata* politisch sehr instabil und damit eine latente Bedrohung für das Römische Reich. Für Unruhen sorgten insbesondere wandernde germanische Völker, wie die Kimbern und Teutonen oder die Sueben, die von Nordosten eindrangen und gallische Stämme in angrenzende Gebiete zwangen.

Genozid im Namen Caesars

So verließ im entscheidenden Jahr 58 v. Chr. der bedeutende keltische Stamm der Helvetier seine Heimat in der Schweiz und wanderte westwärts. Den Versuch, römisches Reichsgebiet zu passieren, deutete Caesar als aggressiven Akt und entfesselte ohne Auftrag des römischen Senates den gallischen Krieg (*bellum Gallicum*).

Glaubt man Caesars Angaben, haben seine Truppen 258 000 Helvetier getötet, lediglich 110 000 überlebten und wurden zur Rückkehr in ihre verwüstete Heimat gezwungen. Die römische Militärmaschinerie wütete mit erschreckender Brutalität. Siedlungen, Felder und Ernten wurden niedergebrannt, Vergewaltigung und Versklavung im großen Stil betrieben, ganze Völker und Stämme ausgerottet. Etwa drei Jahre nach dem Sieg über die Helvetier massakrierten die Soldaten am Niederrhein angeblich 430 000 Germanen vom Volk der Tencterer und Usipeter, die über den Fluss nach Gallien vorgedrungen waren. Der Bericht über diesen Genozid, der auch vor wehrlosen Frauen und Kindern nicht Halt machte, erregte selbst im römischen Senat Empörung, sodass Cato der Jüngere forderte, Caesar wegen Verletzung des Völkerrechts an die Germanen auszuliefern, um den Zorn der Götter gegen Rom zu besänftigen. Doch diese Kritik blieb episodisch und war letztlich innenpolitisch motiviert. Im Wesentlichen herrschte in Rom Begeisterung über Caesars Erfolge, und der Senat billigte die Offensiven im Nachhinein. Kein Wunder: Italien wurde mit erbeutetem gallischem Gold derart überschwemmt, dass der Preis für das Edelmetall um 25 Prozent nachgab. Caesar betrat Gallien als verschuldeter Mann und verließ es als reicher Potentat, der Geld verleihen, Politiker bestechen und riesige Prunkbauten errichten konnte.

Trotz schwerer Verluste in den Jahren 58 bis 53 v. Chr. blieb der gallische Widerstand zunächst ungebrochen. Erst die Niederlage der großen Allianz gallischer Stämme unter ihrem Führer Vercingetorix in der Schlacht von Alesia 52 v. Chr. besiegelte das Schicksal der Kelten Galliens. Die Zahl der Toten, der Versklavten und Verstümmelten, der Waisen und Heimatlosen, die Caesars *bellum Gallicum* gefordert hatte, dürfte in die Millionen gehen.

Angesichts der blutigen Eroberung erstaunt die nun folgende, offenbar sehr gemäßigte und tolerante Kolonialpolitik. Spätestens mit Ende des 1. Jahrhunderts n. Chr. war die Provinz vollständig integriert, seine Bewohner dürften sich als Teil des Imperiums verstanden haben. Denn anders als der europäische Kolonialismus der Neuzeit verzichteten die neuen Herren auf Rassismus und missionarischen Eifer.

Kein Wechsel im Götterhimmel

Geschickt verstanden sie es vielmehr, traditionelle und zur römisch-italischen Kultur passende Strukturen in ihren Dienst zu nehmen. Wenn Römer wie Kelten bereits an eine Vielzahl von Götter glaubten, die auch noch miteinander vereinbar waren, warum dann die einheimischen verbieten? So durfte der zwischen Maas und Mittelrhein siedelnde Stamm der Treverer an seinem Hauptgott Lenus festhalten. Sie setzten ihn gleich mit dem römischen Mars und verehrte ihn fortan als Lenus Mars.

Der allmählichen Integration waren auch kompatible Gesellschaftsstrukturen förderlich, insbesondere das Patron-Klienten-System: Ein Hochrangiger herrschte über eine Vielzahl von Personen niedrigeren Ranges, trug aber auch Sorge für ihr Wohlergehen. Das war in Rom beispielsweise ein Feldherr, der nicht nur seine Beute mit den Soldaten teilte, sondern ihnen auch ein gedeihliches Auskommen nach ihrer Dienstzeit garantierte. Dafür konnte er bei Wahlen zu politischen Ämtern auf ihre Stimme rechnen. In Gallien hatten

Im Schatten des Limes

CHRISTOPH HAUSSNER

Das in Gallien erfolgreiche Konzept, durch Stadtgründungen römische Lebensart zu verbreiten, sollte auch die Germanen rechts des Rheins ins Reich integrieren helfen. Das jedenfalls belegen Ausgrabungen der letzten Jahre in Waldgirmes, einem kleinen Ort im Lahntal, zwischen Wetzlar und Gießen gelegen. Um Christi Geburt entstand hier ein durch Gräben geschütztes Stadtareal mit Keramikmanufakturen und einem umbauten Forum, in dem ein vergoldetes Reiterstandbild aus Bronze vermutlich den Kaiser Augustus verherrlichte. Da sich sowohl römische Artefakte als auch solche aus germanischer Produktion dort fanden, dürften in diesem urbanen Zentrum wirklich für einige Jahre beide Völker friedlich in Koexistenz gelebt haben. Doch zwei Jahre, nachdem der Feldherr und Verwaltungsfachmann Publius Quinctilius Varus den Posten des Statthalters im angeblich befriedeten Germanien übernommen hatte, fanden drei Legionen, drei Reitereinheiten und sechs Kohorten, insgesamt wohl etwa 20000 Mann in der Schlacht im Teutoburger Wald – nach heutiger Kenntnis in einem Sumpfgebiet bei Kalkriese – ein unrühmliches Ende. Die in Gründung begriffenen Römerstädte östlich des Rheins wurden aufgegeben.

Stattdessen entstand seit dem späten 1. Jahrhundert zwischen Rhein und Donau der obergermanisch-rätische Limes, eine Grenze mit wenigstens 900 Wachtürmen, kleineren Militäranlagen und etwa sechzig größeren Kastellen; später kamen Palisaden, Gräben und Wälle hinzu. Sie sollten aber wohl weniger Überfälle verhindern als im Notfall Einheiten aus dem Hinterland durch Feuer-, Rauch- und Hornsignale herbeirufen und den Waren- und Grenzverkehr kontrollieren. Dieser zeigte später in Innergermanien durchaus Wirkung; so entstanden im heutigen Thüringen nach römischem Vorbild organisierte Töpfereizentren. Doch die unmittelbaren Anwohner der Grenze bewahrten sich ihre traditionelle Lebensart. Das belegen auch Nahrungsreste und andere organische Funde: Anders als im römisch besetzten Gebiet dominieren die Sommergetreide die Pflanzenfunde, während Wintergetreide und andere Nutzpflanzen, Obst, Nüsse und Gewürze aus Mittelmeerländern offenbar weder angebaut noch importiert wurden. Wollten sich die Germanen des Limesvorlandes bewusst vom unmittelbar benachbarten Imperium abgrenzen, wie der Archäologe Bernd Steidl von der Prähistorischen Staatssammlung München glaubt? Siegmar von Schnurbein, Direktor der Römisch-Germanischen Kommission in Frankfurt, sieht in dieser Haltung das Ergebnis einer Selektion: Wer Gefallen an der überlegenen Fremdkultur hatte, emigrierte über den Limes in die römische Provinz.

Im heutigen Lahnau-Waldgirmes lebten Legionäre gemeinsam mit Handwerkern und Händlern in wohl friedlichem Kontakt zur einheimischen Bevölkerung (oben rechts: Rekonstruktion des Zentralgebäudes mit Forum). Die Schlacht im Teutoburger Wald 9 n. Chr. beendete die römische Expansion östlich des Rheins und damit auch erste Stadtgründungen.

CHRISTOPH HAUSSNER

VEREIN HEUNEBURGMUSEUM E.V., HUNDERSINGEN

Die Heuneburg bei Herbertingen-Hundersingen an der oberen Donau entstand im 6. und 5. Jahrhundert v. Chr. Sie ist die älteste bekannte Stadtanlage nördlich der Alpen. Die aus verputzten Lehmziegeln errichtete Stadtmauer verrät den Einfluss etruskischer und griechischer Handwerker.

▷ Krieger und Adlige eine Gefolgschaft von sozial tiefer stehenden Stammesangehörigen. Um diese Elite zu Abhängigen Roms zu machen und damit wiederum ihre Klientel zu verpflichten, forderte Caesar Geiseln von den Stämmen, ein damals übliches Verfahren. Meist wurden dafür Söhne führender Adliger ausgewählt. Nach Rom oder in eine andere Stadt des Reiches gebracht, erlebten diese Kinder und Jugendliche die Vorzüge der fortschrittlicheren Kultur. Umerzogen kehrten sie in ihre Heimat zurück und übernahmen ihre Rolle als Vasallen Roms. Viele erhielten sogar Befehl über Auxiliareinheiten – aus Nichtrömern bestehende Hilfstruppen – und kämpften an den Fronten des Imperiums.

Diese Entwicklung spiegeln auch Funde in keltischen Adelsgräbern: Wenige Jahre nach dem Krieg stammten die Beigaben meist noch aus einheimischer Produktion, waren aber ab etwa 30 v. Chr. mehr und mehr Importware. So verdrängte das römische Kurzschwert, *gladius* genannt, das keltische Hiebschwert; Krüge, Siebe und feinkeramische Teller zeugen von römischen Trink- und Gastmahlsitten (siehe Foto Seite 73). Offenbar hatte sich manch ein gallischer Adliger schnell von der schlichten einheimischen Küche getrennt und auch ansonsten von seiner neuen Rolle profitiert.

Wer aber mit den Eroberern nicht kooperierte, verlor Einfluss und Macht. Diesen Prozess konnte der Prähistoriker Ralf Gleser von der Universität Saarbrücken am Gräberfeld von Hoppstädten bei Birkenfeld an der oberen Nahe ablesen (siehe Karte Seite 74). Die Ausgrabungsergebnisse zeigen, dass hier bis in die ersten Jahre nach dem Gallischen Krieg Angehörige einflussreicher Adelsfamilien nach althergebrachter Sitte mit Wagen- und Waffenbeigaben bestattet worden waren. Diese betont konservativ ausgestatteten Gräber enthielten keinerlei Beigaben römischer Produktion. In den Grablegen der folgenden Generation lässt sich eine fortschreitende Verarmung ablesen, die den Machtverlust der dort ansässigen keltischen Adelsfamilien widerspiegeln dürfte.

Drehscheibe Trier

Eine grundlegende Neustrukturierung der von Caesar eroberten Gebiete setzte jedoch erst nach dem Ende des römischen Bürgerkrieges ein. Augustus begab sich zwischen 27 und 13 v. Chr. mehrmals selbst nach Gallien, förderte durch den systematischen Straßenbau eine bessere Erschließung des Landes und verlegte die Legionen aus dem Inneren an den Rhein. Von dort aus sollte die Eroberung Germaniens erfolgen. Damit erlangten die rheinnahen Gebiete Nord- und Ostgalliens zentrale strategische Bedeutung für das Imperium, denn sie mussten nun die Versorgung der Rheinlegionen sichern. Kooperation der einheimischen Eliten war dazu erforderlich; zahlreiche Angehörige der alten keltischen Adelsfamilien erhielten deshalb unter Augustus das römische Bürgerrecht.

Die meisten *oppida* waren nach dem Krieg aufgegeben worden, lediglich Tempelanlagen entwickelten sich an solchen Standorten weiter, wie etwa das Lenus-Heiligtum auf dem Martberg (siehe Karte). Nun entstanden wieder Städte, diesmal aber mit römischem Zuschnitt. In sicherer Entfernung zur Rheingrenze errichtete man in einer Talweite der Mosel gleichsam vom Reißbrett ein urbanes Zentrum, die Augusta Treverorum, heute Trier. Die Bevölkerung bestand überwiegend aus einheimischen Galliern vom Stamm der Treverer, die aus aufgegebenen *oppida* umgesiedelt worden waren oder vom Land zuzogen. Immigranten, die es als römische Verwaltungsbeamte, Militärs oder als Kaufleute aus Italien und anderen römischen Provinzen nach Trier verschlug, waren dagegen deutlich in der Minderheit. Die Stadt entwickelte sich rasch zur Wirtschafts- und Verwaltungsdrehscheibe. Nach diesem Schema sollte wohl auch das rechtsrheinische Germanien romanisiert werden (siehe Kasten vorige Seite), doch die vernichtende Niederlage im Teutoburger Wald bei Kalkriese setzte diesen Plänen 9 n. Chr. ein Ende (Spektrum der Wissenschaft 2/1992, S. 40; 2/2000, S. 76).

Elemente der als überlegen empfundenen Fremdkultur wurden von keltischen Stadtbewohnern nach und nach übernommen und zunehmend als Bestandteil der eigenen Kultur angesehen. Schließlich profitierten diese Menschen davon. Die archäologischen Funde lassen keinen Zweifel daran, dass Gallien unter römischer Herrschaft einen enormen wirtschaftlichen Aufschwung erlebte. Hochwertige Feinkeramik, Bronzeschmuck, Glas und Eisengeräte, die in der vorrömischen Eisenzeit kostbar und rar waren, gehörten spätestens seit dem 2. Jahrhundert n. Chr. zum täglichen Gebrauchsgut eines Großteils der Bevölkerung. Aquädukte sicherten die Wasserversorgung der Stadtbevölkerung, und Kanalsysteme führten das Abwasser aus den urbanen Zentren hinaus. Intensivierung und Spezialisierung der Landwirtschaft nach römischem Vorbild verbesserte die Ernährungslage.

Auch die medizinische Versorgung der einheimischen Bevölkerung dürfte sich durch den kulturellen Einfluss Roms wesentlich verbessert haben. Im großen Gräberfeld des römischen Marktfleckens von Belginum (heute Morbach-Wederath, sie-

he Karte Seite 74) im Hunsrück, das unter der Leitung des Archäologen Alfred Haffner (Universität Kiel) vollständig ausgegraben wurde, fanden sich Bestattungen von Zahnärzten und Badern, die mit ihren medizinischen Instrumenten beigesetzt worden waren. Dergleichen findet man für das 1. bis 3. Jahrhundert n. Chr. zwar im römischen Reichsgebiet in großer Zahl, außerhalb des Imperiums aber kaum.

Der Anthropologe Manfred Kunter von der Universität Gießen hat die Skelettreste von Leichenbränden des Wederather Gräberfeldes untersucht und eine deutlich reduzierte Kindersterblichkeit im Zuge der Romanisierung ermittelt. Demnach betrug die durchschnittliche statistische Lebenserwartung während der vorrömischen Zeit 17,3 Jahre, in römischer Zeit dagegen immerhin 27,5 Jahre. Eine weitere Beobachtung des Anthropologen: Die Wederather Frauen litten in der römischen Zeit weniger unter Krankheiten; Mangelernährung, und Infektionen hatten viel von ihrem Schrecken verloren. Allerdings mussten die Männer nach der Besetzung Galliens offensichtlich härter arbeiten – degenerative Veränderungen an der Wirbelsäule und an den großen Gelenken nahmen deutlich zu.

Die allgemeine Verbesserung der Lebensqualität spiegelt sich auch im Bevölkerungswachstum: Siedlungs- und Gräberfunden zufolge lebten im römisch besetzten Gallien zeitweise mehr als zwanzig Menschen pro Quadratkilometer. Allerorten wurden im späten 1. und 2. Jahrhundert n. Chr. *villae rusticae* (ländliche Gehöfte) neu errichtet. Neue archäologische Kartierungen zeigen, dass das Trierer Land von einem dichten Netz von Bauernhöfen überzogen war, die maximal einen Kilometer voneinander entfernt lagen. Marktflecken und Kleinstädte säumten die Fernstraßen. Die Gesamtbevölkerung Galliens während der provinzialrömischen Blütezeit im 2. und 3. Jahrhundert n. Chr. wird auf etwa elf Millionen Menschen geschätzt. Eine vergleichbare Bevölkerungsdichte erreichte Gallien erst wieder im Hochmittelalter und während der frühen Neuzeit. Wer hätte angesichts solcher Vorteile der Fremdkultur widerstehen können?

Aufstand der Hilfstruppen

Auf dem Land verlief die Entwicklung länger in traditionellen Bahnen als in den Städten: Noch vier Generationen nach dem Ende des Gallischen Krieges wohnte die einfache Landbevölkerung in stroh- oder holzgedeckten Pfosten- oder Fachwerkbauten und lebte von dem, was die Scholle hergab. Erst im letzten Viertel des 1. Jahrhunderts n. Chr. änderte sich diese Lage. So entstanden zum Beispiel im Stammesgebiet der Treverer vielerorts respektable Gehöfte, Tempelanlagen und Marktflecken aus Stein. Andererseits wurden viele keltisch geprägte Friedhöfe plötzlich nicht mehr genutzt.

Der römische Geschichtsschreiber Publius Cornelius Tacitus (etwa 55–115 n. Chr.) hat möglicherweise eine Ursache dieser Entwicklung überliefert: In den Jahren 69 und 70 n. Chr., also etwa 130 Jahre nach der Eroberung durch Caesar, erhoben sich verschiedene nordgallische und niedergermanische Stämme gegen Rom. Die Anführer waren einheimische Adlige, die das römische Bürgerrecht besaßen und als Offiziere Auxiliareinheiten befehligten. Dem Treverer Iulius Classicus und dem Bataver Iulius Civilis gelang es zeitweise sogar, das Gebiet der heutigen Niederlande und die südlich anschließenden Regionen an Rhein, Mosel und Saar unter Kontrolle zu bringen. Die in Novaesium und Bonna, dem heutigen Neuß beziehungsweise Bonn, stationierten regulären römischen Legionen schlossen sich den aufständi- ▷

Schon im 6. Jahrhundert v. Chr. war den Kelten die mediterrane Kultur bekannt, wie der aus Griechenland stammende große Bronzekessel im berühmten Fürstengrab von Hochdorf beweist.

ROSE-HAJDU

schen Treverern an und ließen sich von Classicus neu vereidigen. Ob sie ihm oder dem ausgerufenen *imperium Galliarum*, also einem von Rom unabhängigen Gallischen Reich die Treue schworen, ist nicht bekannt. Schlechter erging es den Legionären in Castra Vetera (Xanten). Nach erfolgreicher Belagerung richteten Civilis und seine batavischen Verbände ein Blutbad an und machten das Lager dem Erdboden gleich.

Die Hintergründe des Aufstandes liegen im Dunkeln. Wahrscheinlich spielten Übergriffe römischer Militärs bei der Aushebung von Truppen in Niedergermanien und Nordgallien eine Rolle. Letztlich verantwortlich dürfte jedoch die chaotische innenpolitische Situation des Römischen Reiches gewesen sein. Zwischen Juni 68 und Dezember 70 n. Chr. regierten in Rom fünf verschiedene Kaiser: Nero, Galba, Otho, Vitellius und Vespasian. Bis auf Letzteren fanden sie alle in diesem Zeitraum einen gewaltsamen Tod. Während sich die überwiegend aus Italien stammenden, am Rhein stationierten Legionäre letztlich opportunistisch verhielten und sich relativ schnell mit den wechselnden Machtverhältnissen arrangierten, war die einheimische Bevölkerung einschließlich der Auxiliareinheiten offensichtlich tief verunsichert. Die gallischen Adligen fühlten sich als Klienten jener Dynastie verpflichtet, die Caesar und Augustus begründet hatten. Die neuen Machthaber des Jahres 69 gehörten diesem Herrscherhaus nicht an und waren aus dieser Sicht keine legitimen Herrscher, Vespasian, Sohn eines römischen Zollbeamten, noch nicht einmal edler Herkunft.

Im 1. Jahrhundert n. Chr. kam eine prorömische Schicht Wohlhabender auf dem Lande zu Einfluss. Sie organisierten die landwirtschaftliche Produktion nach dem Vorbild römischer Gutshöfe. Dass sie erfolgreich Gewinne erwirtschafteten, belegen Villenanlagen wie die in Borg im Saarland. Die Rekonstruktion zeigt den Hof mit Zierbecken, den Repräsentationsbau (links) und das Badehaus (rechts).

Abgesang der Druiden

Im Unterschied dazu konnte sich Iulius Classicus auf vorrömische königliche Abstammung berufen. Es ist durchaus wahrscheinlich, dass die reichen und politisch einflussreichen Repräsentanten der alten keltischen Adelsfamilien selbstbewusst beschlossen hatten, angesichts der chaotischen Entwicklung in Rom in eigener Sache politisch aktiv zu werden.

Welche Motive die Aufständischen im Einzelnen verfolgten, ob sie lediglich die neuen Kaiser in Rom oder die Herrschaft Roms schlechthin ablehnten, lässt sich nicht ermitteln. Ebenso unklar ist die Rolle der Druiden in diesem Aufstand. Die Priester und einstigen Erzieher der Jugend verstanden sich als Bewahrer keltischer Geschichte, Mythologie und Religion. Obwohl das Römische Imperium in den eroberten Provinzen in aller Regel eine tolerante Religionspolitik praktiziert hatte, waren die Druiden Galliens und Britanniens wiederholten Verfolgungen ausgesetzt. Schon zur Zeit Caesars opponierten einige von ihnen gegen den römischen Einfluss. Zu einem systematischen und harten Vorgehen gegen die keltische Priesterschaft und ihre Lehre sah sich aber erst Kaiser Claudius (10 v. – 54 n. Chr.) gezwungen. Das könnte ein Indiz dafür sein, dass sich gegen Mitte des 1. Jahrhunderts n. Chr. eine religiös motivierte Freiheits- oder Heilsbewegung formiert hatte. Als um die Jahreswende 69 auf 70 die Nachrichten vom Brand des Kapitols in Rom, vom Tod des Kaisers Vitellius und von der Anerkennung des Emporkömmlings Vespasian durch den Senat den Rhein erreichten, sollen die Druiden das Ende des Römischen Reiches geweissagt haben.

Es ist denkbar, dass die keltische Priesterschaft, die offensichtlich als einzige gesellschaftliche Gruppe aktiven Widerstand gegen die fortschreitende kulturelle Assimilation leistete, eine entscheidende Rolle in den Aufständen der Jahre 69/70 n. Chr. spielte. Dieses Phänomen – Widerstand einige Generationen nach der Unterwerfung mit charismatischen Religionsführern an der Spitze – hat es im Laufe der Geschich-

KULTURSTIFTUNG FÜR DEN LANDKREIS MERZIG-WADERN / HELWIN GÖTZINGER

Menschenopfer oder Bestattungsritus?

JEAN-RÈNE CHATILLON / ARKEOMAKET

Skelette in gekrümmter Haltung fanden Archäologen in Acy-Romance. Vermutlich hatten Druiden diese Menschen geopfert, dann waren sie in Holzkisten gezwängt und in Schächten der Verwesung ausgesetzt worden.

Unser Wissen über die keltische Kultur ist sehr lückenhaft, da sie erfolgreich von der römischen verdrängt wurde. So wissen wir nicht, ob die Berichte römischer und griechischer Historiker wirklich zutreffen, wonach die Kelten Menschenopfer vollzogen und die Schädel erschlagener Feinde einbalsamierten oder zu Trinkschalen verarbeiteten. In jedem Fall dienten entsprechende Greuelgeschichten der römischen Propaganda und lieferten Vorwände für die caesarische Expansionspolitik. Ausgrabungen der letzten Jahrzehnte deuten allerdings darauf hin, dass Menschenopfer in einigen Regionen Galliens tatsächlich praktiziert wurden und dass die Kelten Bestattungssitten hatten, die auf römische Beobachter höchst befremdlich wirken mussten. So fanden Archäologen in dem keltischen Heiligtum von Ribemont-sur-Ancre (Frankreich) Skelette enthaupteter Männer, die mit Waffen in einem Graben lagen. Im keltischen Dorf von Acy-Romance in den französischen Ardennen freigelegte Skelette verblüfften durch eine stark gekrümmte Sitzhaltung. Wahrscheinlich hatte man die Leichname in enge Holzkisten gezwängt, um sie dann in einem tiefen Schacht der Verwesung auszusetzen. Erst danach wurden sie begraben. Die eigentümliche Fundlage und ein Beilhieb auf einem der Schädel lassen vermuten, dass auch diese Menschen bei kultischen Handlungen getötet wurden. Da diese Praktiken mit der römischen Kultur vollkommen unvereinbar waren, nimmt es nicht wunder, dass sie im besetzten Gallien schnell verschwanden.

te immer wieder in unterschiedlicher Ausprägung gegeben; man denke nur an die gewaltsame Mau-Mau-Bewegung in Kenia oder die friedliche nordamerikanische Geistertanzbewegung im späten 19. Jahrhundert.

Luxuriöse Prunkvillen

Und wie so oft in der Geschichte scheiterte auch dieser Aufstand am Militärapparat der Machthaber. Nachdem der Aufstand von zusätzlichen Legionen niedergeschlagen worden war, flüchteten 70 n. Chr. mehr als hundert treverische Senatoren – ein Großteil der aristokratischen Führungsschicht – über den Rhein ins freie Germanien. Vermutlich konfiszierte das Imperium daraufhin ihre Ländereien und verteilte sie neu. Davon dürfte eine prorömische Mittelschicht profitiert haben, die nun mit Eifer die ländlichen Gebiete umstrukturierte. Die bislang auf Selbstversorgung ausgerichtete Landwirtschaft wurde weiter intensiviert und auf Überschussproduktion ausgerichtet. Allerorten entstanden luxuriöse Prunkvillen (siehe Rekonstruktion links): Wohnsitze von Großgrundbesitzern, von denen die einfache Landbevölkerung als Pächter, Arbeiter oder Sklaven abhängig war. Das alte Patron-Klienten-System, das durch die Emigration der treverischen Adligen seine Basis verloren hatte, wurde nun durch neue Formen der Abhängigkeit ersetzt. Von da an konnte sich auch auf dem Lande niemand mehr der Romanisierung entziehen. Wie auch in heutiger Zeit dürften sich Angehörige der älteren Generation schwer damit getan haben, der rasanten Veränderung ihrer Lebenswelt zu folgen.

Der letzte Widerstand gegen das Imperium war gebrochen. Die wirtschaftliche und politische Lage blieb fortan stabil, die römische Kultur- und Religionspolitik sehr moderat. Vermutlich erschien die Zugehörigkeit zum Weltreich der Mehrheit der Kelten schließlich nicht nur segensreich, sondern selbstverständlich. Keine andere große ethnisch-kulturelle beziehungsweise sprachliche Gruppierung Europas wurde in einem solchen Maße überfremdet und ausgelöscht wie die der Kelten. Die archäologischen und literarischen Quellen lassen keinen Zweifel daran, dass von deren ursprünglicher Kultur im 4. Jahrhundert n. Chr. nur noch Rudimente erhalten waren.

Trier hatte sich vom Vorort zur Kaiserresidenz und führenden Metropole im Westen des Römischen Reiches, zu einer durch und durch römischen Stadt, entwickelt. Wie stark auch die umliegende Landschaft mediterran geprägt war, veranschaulicht eine epische Beschreibung des Mosellandes, die der in Trier lebende Prinzenerzieher Ausonius (etwa 310–395 n. Chr.) um 371 n. Chr. verfasst hat: »Villen, die mit ragendem Giebel auf Felsen stehen ... und Schlösser schmücken bald hüben, bald drüben die Ufer ... Käme ein Gast von Cumaes Gestaden hierher, so würde er meinen, das euböische Baiae habe dieser Gegend ein bescheidenes Abbild von sich geschenkt, solche Verfeinerung und solcher Glanz locken hier ...«

Bald verdrängte das Christentum die Überbleibsel der druidischen Religion und Latein ersetzte die keltische Sprache. Nur außerhalb des Imperiums, in Irland, Schottland, Wales und Teilen Südwestenglands konnte sie sich behaupten. Als das Imperium im 5. Jahrhundert n. Chr. unter dem Ansturm der Völkerwanderung zerbrach, brachten Bretonen aus Südwestengland das Keltische zurück auf den Kontinent. Ohne Bemühungen im 20. Jahrhundert, den einst bedeutenden Zweig des Indoeuropäischen zu erhalten, wäre Keltisch heute längst eine vergessene Sprache. ◁

Der Archäologe **Dirk Krausse** ist Privatdozent für Ur- und Frühgeschichte an der Universität Kiel. Im Rahmen des Schwerpunktprogramms »Romanisierung« der Deutschen Forschungsgemeinschaft leitete er Projekte im Trierer Raum; die Ergebnisse dieser Arbeiten waren Thema seiner Habilitationsschrift.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Literaturhinweise

Schwerpunktthema Romanisierung. Von Alfred Haffner et al. in: Archäologie in Deutschland, Heft 3, S. 18 (2001).

Kelten, Germanen, Römer im Mittelgebirgsraum zwischen Luxemburg und Thüringen. Von Alfred Haffner et al. (Hg.). Habelt, Bonn 2000.

Roman Germany. Studies in cultural interaction. Von J.D. Creighton et al. (Hg.). Supplementary Series No. 32, Journal of Roman Archaeology, Oxford und Portsmouth/Rhode Island, 1999.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

NTC NANO TECH COATINGS

Ohne Chrom geht's auch

Korrosionsschutz durch neuartige Beschichtung

Damit Automobile leichter werden und somit weniger Benzin verbrauchen, verwenden die Konstrukteure häufig Aluminium und Magnesium. Anders als Stahl lassen sich diese Leichtmetalle aber nicht durch Verzinken gegen Korrosion schützen. Stattdessen werden sie mit Chromsalzen behandelt und dann lackiert. Die so genannte Chromatierungsschicht bietet nicht nur Schutz, sondern gibt dem Lack auch Halt auf der Metalloberfläche.Weil Chromsalze aber giftig sind und Krebs fördern können, sollen sie gemäß einer EU-Verordnung immer weniger verwendet und in fünf Jahren gänzlich außer Gebrauch sein. Vertreter der Automobilindustrie beklagen dies als einen Schlag gegen die Leichtbauweise, da kein geeigneter Ersatz existiere.

»Unser Schutzüberzug erfüllt alle Anforderungen und ist billiger«, hält Georg Wagner, der Chef des Unternehmens NTC Nano Tech Coatings dagegen. »Selbst mehrere tausend Stunden im Salzsprühtest können der Schicht nichts anhaben.«

Das fragliche Produkt namens Clearcoat U-Sil gibt es in zwei Varianten. Beide ersetzen die Chromatierung und sind rund zehn Mikrometer dick, wie ein Zehntel eines Haares. Eine Variante dient als Grundierung und kann danach wie bisher lackiert werden. Die andere hat einen Antihafteffekt und ersetzt mit Farbpigmenten gemischt den bisherigen Lack. Das spart Arbeitsgänge ein; auch die Menge an Lösemitteln kann drastisch reduziert werden.

Diese Vorteile beruhen auf der so genannten Sol-Gel-Technik, die hier erstmals mit klassischen Lackierverfahren kombiniert wird. Das Sol bildet sich aus Silanen, speziellen Molekülen mit einem Siliziumkern und Alkoholresten. In wässriger Lösung und nach Zusatz von Säuren oder Laugen beginnen die Moleküle zu polymerisieren. Schließlich liegt ein Sol vor: eine Suspension aus vierzig bis fünfzig Nanometer großen Teilchen in Wasser.

Wie ein Lack lässt es sich auf Bleche auftragen. Während das Sol trocknet, verbinden sich seine Partikel zum so genannten Gel. Auf etwa 160 Grad Celsius erwärmt, verdampft das Lösungsmittel völlig aus der Schicht. Dabei verbinden sich die Teilchen weiter zu einem Polymernetz. Dieses ist sehr hart und zudem sehr dicht, sodass aggressive chemische Verbindungen und Luftsauerstoff kaum noch zur Oberfläche des Leichtmetalls durchdringen können.

Die nun schon einige Jahrzehnte alte Sol-Gel-Chemie dient unter anderem zur Antihaft-Beschichtung von Verbandsstoffen oder zur Herstellung von mikroporösen Filtrationsmembranen, aber nicht zum Lackieren. Der Chemiker Wagner hatte das Verfahren als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Neue Materialien in Saarbrücken kennen gelernt. Mitte der 1990er Jahre arbeitete er als Laborleiter in der Lackindustrie und erkannte die Parallelen beider Techniken. Wagner machte sich selbstständig und entwickelte die passenden Silane.

Die Autoindustrie zeigt Interesse: »Wir verhandeln mit praktisch allen Großen der Branche.« Der Unternehmenschef ist zudem mit der Flugzeugindustrie im Gespräch. Auch dort setzen die Techniker auf Leichtmetalle. Derzeit wird der NTC-Schutzüberzug bei britischen Harrier-Senkrechtstartern getestet, die teilweise aus Magnesium bestehen. Wenn diese Maschinen auf Flugzeugträgern stationiert sind, sorgt

Die Beschichtung von NTC schützt diesen Aluminium-Schaltknauf gegen aggressiven Handschweiß.

ALLE FOTOS: NTC NANO TECH COATINGS

Neue Möglichkeiten für Designer: Mit einer Sol-Gel-Lackierung wirkt diese Glasflasche wie sandgestrahlt.

Optionen für Konstrukteure: Sol-Gel-beschichtete Komponenten für einen Magnesium-Bremskraftverstärker

DAS UNTERNEHMEN IM PROFIL

Nano Tech Coatings (NTC) wurde im September 2000 von dem promovierten Chemiker und Lackexperten Georg Wagner gegründet. Wagner forschte mehrere Jahre am Institut für Neue Materialien in Saarbrücken auf dem Gebiet der **Sol-Gel-Technik** und arbeitete später in der Lackindustrie. Drei fest angestellte Mitarbeiter entwickeln und produzieren Beschichtungsstoffe auf Basis chemischer Nanotechnologie im saarländischen Tholey.

die salzhaltige und feuchte Luft dafür, dass bestimmte Teile jeden Monat ausgetauscht werden müssen.

Weitere Anwendungen locken in der Elektronikindustrie: Gehäuse für Handys, Kameras oder Laptops sollen künftig aus Magnesium bestehen. Auch in der Medizintechnik besteht Bedarf: Wegen der extremen Stabilität von Prionen, den Verursachern der Rinderkrankheit BSE und der neuen Variante der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit, müssen Zangen oder Klammern für die Chrirugie besonders hohe Temperaturen bei der Sterilisierung aushalten. Ohne einen effektiven Schutzüberzug sinkt aber die Gebrauchsdauer der Werkzeuge. NTCs DuroFluor wird derzeit in der Industrie getestet.

Außer für Aluminium und Magnesium eignet sich das Beschichtungsverfahren auch für Edelstahl, Messing, Silber, Glas oder Keramik. Mit fluororganischen Silanen wird der Überzug Wasser abweisend. Die Wirkung ist laut Hersteller mit der als Lotus-Effekt bezeichneten Selbstreinigung von Oberflächen vergleichbar: Weil Wasser darauf nicht haften kann, fließt es rasch ab und nimmt Schmutzteilchen mit (der Lotus-Effekt beruht allerdings auf der mikroskopischen Struktur der Oberfläche). Für Badewannen und Waschbecken bietet ein Vertriebspartner bereits das Produkt Hyper-Perl an. Ein Jahr lang soll der Schutz vorhalten. Als Fassadenschutz dürfte es sich allerdings nicht eignen, denn die Fluor-Silane sind schon als Grundstoff recht teuer. Denkbar wäre aber eine Anwendung bei Automobilen: als Schmutz abweisende Beschichtung der Windschutzscheibe. ◁

Norbert Aschenbrenner

Der Autor ist promovierter Chemiker. Er arbeitet als Wissenschaftsjournalist in München.

Spektrum der Wissenschaft
Zum Erfolg mit Online@dressen

➤ Aetherforschung
Neue Impulse für die Naturwissenschaften, und die Mathematik
www.aether-research.de

➤ Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

➤ Forschungszentrum Jülich
Brennstoffzellen
Technologie, Jobs, Dissertationen, Diplomarbeiten
www.fuelcells.de/jobs

➤ Forum MedizinTechnik und Pharma in Bayern e.V.
Innovationen für die Medizin
www.forum-medtech-pharma.de

➤ PARA BioScience GmbH – We Are Immunology –
Immunologische Testungen, in vivo-in vitro. Präklinik. Antikörper auch durch Gensequenz
www.para-bioscience.com

➤ Prof. (apl.) Dr. habil. Harald Reiss
Energy technology, heat transfer, superinsulations, numerical simulations
www.haraldreiss.de

➤ Spektrum Akademischer Verlag
www.spektrum-verlag.com

➤ Sterne und Weltraum Verlag
www.suw-online.de

➤ Wissenschaft Online GmbH
Wir machen Wissenschaft transparent!
www.wissenschaft-online.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 80,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag bestehend aus einer Branchenzeile, Firmenname und WWW-Adresse. Zusätzlich erscheint Ihre Anzeige als Link-Eintrag auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft.

Informationen erhalten Sie direkt von
GWP media-marketing
Anzeigenverkauf Spektrum der Wissenschaft • Mareike Grigo
Telefon (02 11) 887-23 94 • Telefax (02 11) 887-23 99
E-Mail: m.grigo@vhb.de

Mit der Veröffentlichung Ihrer WWW-Adresse im Heft und im Internetangebot von Spektrum der Wissenschaft erreichen Sie eine gehobene Zielgruppe und gewinnen für Ihre Online-Kommunikation hohe Aufmerksamkeitswerte.

www.spektrum.de
Ihre Anlaufstelle für Wissenschaft im Internet

MATHEMATIK

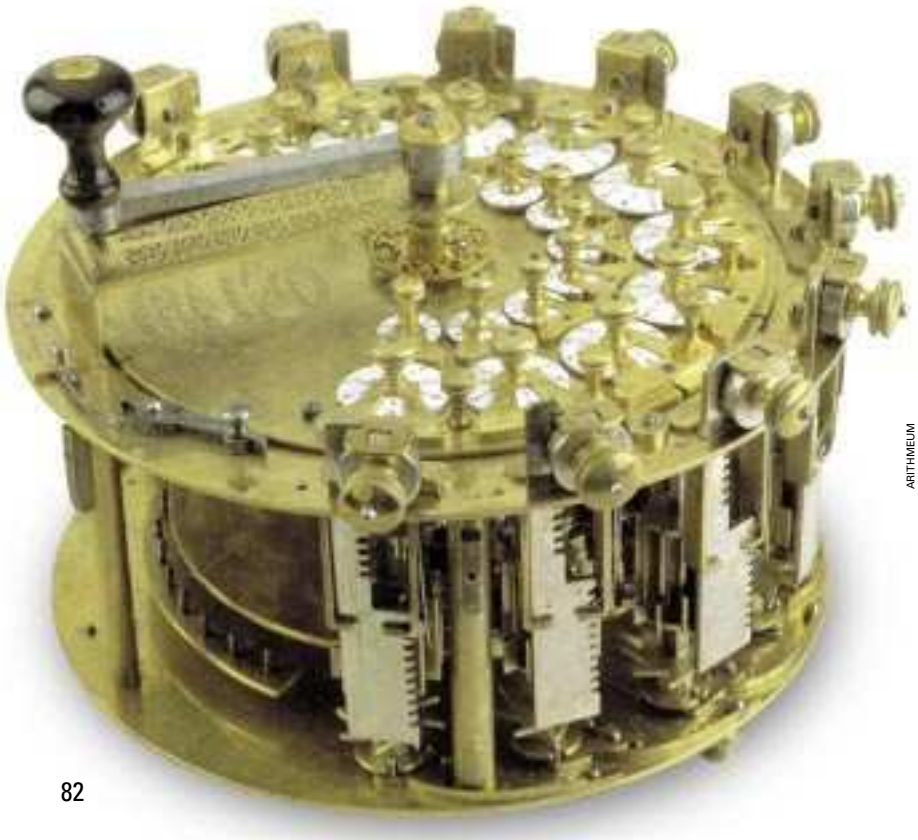
Ein Museum zum Anfassen

Das Arithmeum in Bonn präsentiert die weltweit größte Sammlung mechanischer Rechenmaschinen und zeigt die historische Entwicklung von antiken Rechenbrettern bis zu Halbleiter-Chips.

Von Nils Röller

Es fing in den 1960er Jahren an, als Bernhard Korte, damals Student der Mathematik, bei einem Trödler eine kleine Kurbelmaschine erwarb, eine Brunsviga M. Dieses Gerät wurde zwischen 1908 und 1915 industriell hergestellt. Korte reparierte es, um damit Rechenaufgaben zu lösen. Dabei lernte er die bizarre Mechanik des Geräts kennen, der er oft mit Schraubenzieher und Ölkännchen nachhelfen musste. Die Maschine bildete schließlich den Grundstein für eine Sammlung, die mittlerweile rund 1300 Rechengeräte umfasst – unter anderem antike Rechenbretter, peruanische Knotenschnüre, kostspielig erworbene und langwierig nachgebaute Rechenmaschinen aus der Schule des schwäbischen Pfarrers Philipp Matthäus Hahn (1739–1790) sowie Mikroprozessoren, die das Institut für diskrete Mathematik der Universität Bonn entwickelt. Eine Lücke besteht zwischen mechanischen Bürorechnern und heutiger Chip-Technologie. Das Museum verzichtet auf die Ausstellung historischer digitaler Computer.

Seit September 1999 ist diese Sammlung im Arithmeum, nahe dem Bonner Hofgarten, zu bewundern. Die Glasfassade des Gebäudes gewährt selbst nachts Blicke auf Ausstellungen mit moderner abstrakter Malerei und auf den Maschinenpark. Korte, heute Leiter des im gleichen Gebäude residierenden Instituts für diskrete Mathematik, schenkte diese Sammlung 1977 dem Land Nordrhein-Westfalen. Sie wird im Arithmeum mit dem Ziel ausgestellt, die Geschichte des Rechnens »einst und heute« begreiflich zu machen. Das ist durchaus wörtlich zu nehmen, denn auf jedem Stockwerk stehen Modelle, an denen Rechensteine, Zahnräder und Tastaturen bewegt werden können. Sie gestatten den Besuchern, schrittweise die Epochen der Abstraktion von steinernen Merkzeichen bis zum mechanischen Zehnerübertrag nachzuvollziehen.



ARITHMEUM

Bei dieser Innenansicht der Rechenmaschine von Johann Christoph Schuster, die er von 1820 bis 1822 in Ansbach schuf, sind die Einstellstifte, welche die Staffelwalzen bewegen, sowie der Zehnerübertragsmechanismus zu sehen.

Vor dem Geschäftszimmer im obersten Stockwerk des Gebäudes sind in einer Vitrine peruanische Quipus zu sehen. Solche Knotenstricke verwendeten die Inkas, um innerhalb ihres Andenreiches Informationen über Vorräte und Truppenstärken zu übermitteln. Der Aspekt der Notation und Übermittlung von Mengen gegebener Gegenstände tritt bei den Rechenbrettern der europäischen Antike zurück. Der römische Abakus verwendet neben Kugeln, die für die Einheiten des römischen Währungssystems (As, Sesterz, Denar) stehen, auch Kugeln, die als Merkzeichen beim Übertrag fungierten.

Die Einführung des arabischen Systems und der indischen Ziffern einschließlich der Null in Europa, die im 11. Jahrhundert begann und sich im 16. Jahrhundert dann allgemein durchsetzte, kann am Wandel der Rechenmittel nachvollzogen werden. Auf dem Titelbild des 1529 erschienenen zweiten Rechenbuchs von Adam Ries wird der Wettstreit zwischen alter Rechentechnik mit dem Brett und neuem schriftlichem Rechnen (»Rechnung auff der Linihen und Federn«) gezeigt.

Zehnerübertrag als Innovation

Erst das schriftliche Rechnen gestattete die Umsetzung des Rechenprozesses auf ein mechanisches Räderwerk. Wilhelm Schickard (1592–1635), Professor für biblische Sprachen in Tübingen, fertigte zwei solcher Apparate an, einen davon für den Astronomen Johannes Kepler. Beide Rechenmaschinen verbrannten während des Dreißigjährigen Kriegs. Ihre Konstruktion geriet dann in Vergessenheit. Der im Arithmeum gezeigte Nachbau, vor vierzig Jahren von dem Mathematiker und Philosophen Bruno Baron von Freytag Löringhoff (1912–1996) ausgeführt, verdeutlicht das Problem des mechanischen Zehnerübertrags bei der Addition oder Subtraktion. Adam Ries lehrte in seinen Anweisungen zum schriftlichen Rechnen, dass beim Übertrag von 9 nach 10 ein Zehnerübertrag auf die nächsthöhere Stelle vorgenommen werden muss. Das übernahmen in Schickards Konstruktionen Zahnräder. Der automatische Zehnerübertrag ist der ent-

ARITHMEUM

Zeichnung einer Staffelwalze von Gottfried Wilhelm Leibniz mit neun unterschiedlich langen gestaffelten Rippen. Es ist das grundlegende Prinzip zur mechanischen Darstellung einer Zahl.

scheidende Unterschied zu den Rechenstäben des schottischen Mathematikers John Napier (1550–1617) und anderen Rechengeräten, bei denen der Nutzer den Übertrag schriftlich oder im Kopf tätigen muss.

Im Jahr 1623 schrieb Schickard an Kepler: »Ferner dasselbe was Du rechnerisch gemacht hast, habe ich kürzlich auf mechanischem Wege versucht, und eine aus elf vollständigen und sechs verstümmelten Rädchen bestehende Maschine konstruiert ... Du würdest hell auflachen, wenn Du da wärest und erlebtest, wie sie die Stellen links, wenn es über einen Zehner oder Hunderter weggeht, ganz von selbst erhöht.«

Der Freude über den Zehnerübertrag folgte der Ärger mit der Addition mechanischer Kräfte. Schickard hatte mit einem Problem zu kämpfen, das die Erfinder noch weitere zweihundert Jahre beschäftigte. Die Ziffern und ihre Verknüpfungen durch die Grundrechenarten wurden durch Umdrehungen von Zahnrädern dargestellt. Je mehr Stellen die Zahlen aufwiesen, desto mehr Zahnräder und Umdrehungen mussten aufeinander abgestimmt werden. Das erhöhte den Aufwand an mechanischer Arbeit.

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) fand mit dem Staffelwalzenprinzip eine entscheidende Lösung (Bild oben). Es ist die wichtigste mechanische Darstellungsart von Zahlen. Leibniz erfand auch das Sprossenradprinzip, eine andere Darstellungsart, das er aber selbst nicht mechanisch realisierte. Hingegen verwendete er das Staffelwalzenprinzip für den Bau einer quaderförmigen Rechenmaschine, die er 1673 in London der Royal Society als Prototyp aus Holz vorführte und später in Messing ausführen ließ.

Prunkstücke der Sammlung im Arithmeum sind Nachbauten oder Originale der Folgemaschinen von Antonius Braun (1685–1727), dem bereits erwähnten Philipp Matthäus Hahn, Johann Helfrich Müller (1746–1830) und Johann Christoph Schuster (1759–1823). Den Höhepunkt der Feinmechanik und vorindustriellen Rechentechnik bildet die Maschine, die Schuster zwischen 1820 und 1822 in Ansbach fertigte (Bild Seite 82). Das Original wurde im März 2000 dem Arithmeum übergeben, das sieben Jahre lang Mittel für den Erwerb gesammelt hatte. Ein Bild der Maschine schmückt zudem eine 56-Cent-Briefmarke der Deutschen Post.

Der Tüftler Hahn hatte einwandfrei das Problem gelöst, dass sich die Kräfte beim Übertrag addieren. Der kreisförmige Grundaufbau seiner Maschine gestattete das sukzessive Bearbeiten an den aufeinander folgenden Stellen. Schuster verfeinerte die von seinem Lehrer und Schwager Hahn ersonnene Konstruktion und schuf eine kompaktere Maschine. Mit diesen Konstruktionen legten sie den Grundstein für die Entwicklung der Feinmechanik in Baden-Württemberg.

Einen ähnlichen Standortvorteil baut das Arithmeum auf. Dort hat sich Ulrich Wolff mit dem Nachbau von historischen Maschinen für die Sammlung eine unter Museumsfachleuten weltweit anerkannte Kompetenz erworben, die das Arithmeum in Bonn zu einer ersten Adresse für Kenner und Sammler vorindustrieller mechanischer Rechengeräte gemacht haben. ◁

Nils Röller promovierte über die Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft an der Universität Weimar und forscht am Zentrum für Kunst und Medientechnologie Karlsruhe.

INFORMATION

▶ **Arithmeum**, Rechnen einst und heute, im Forschungsinstitut für diskrete Mathematik, Lennéstraße 2, 53113 Bonn, geöffnet dienstags bis sonntags, 11-18 Uhr.

GROSSFORSCHUNG

Tesla und die Perspektiven der Teilchenphysik

Wie sich eines der dynamischsten Forschungsgebiete in Deutschland und Europa in den nächsten Jahren entwickelt, hängt wesentlich davon ab, ob der Elektron-Positron-Linearcollider Tesla gebaut wird.

Von Uwe Reichert

Die Teilchenphysik hat sich in den letzten fünfzig Jahren zu einem eigenständigen, überaus fruchtbaren Forschungsgebiet entwickelt. Experimente mit hochenergetischen Teilchenstrahlen – durchgeführt an großen Beschleunigern – liefern Erkenntnisse über die innerste Struktur von Materie, Raum und Zeit sowie über die fundamentalen Kräfte im Universum. Erst mit diesem Wissen lässt sich die oftmals verwirrende Vielfalt der Naturphänomene verstehen.

Wir wissen heute, dass es eine Vielzahl von subatomaren Teilchen gibt, die sich in ein wohl geordnetes Schema einfügen. So gibt es neben dem Elektron, das in der Hülle der Atome auftritt, verwandte Teilchen, welche die Physiker als Leptonen zusammenfassen. Proton und Neutron sind zwar die Grundbausteine der Atomkerne, bestehen ihrerseits aber aus noch kleineren Einheiten, den Quarks. Nach unserem heutigen Verständnis sind Leptonen und Quarks die elementaren Bausteine der uns bekannten Materie.

Einen nicht minder bedeutenden Anteil am Aufbau der Welt haben die vier fundamentalen Kräfte im Universum. Die Schwerkraft und die elektromagnetische Kraft sind uns aus unserer makroskopischen Alltagswelt vertraut. Die schwache Kraft ist für radioaktive Zerfälle von Atomkernen verantwortlich. Die starke Kraft wiederum wirkt nur auf kürzeste Entfernung und nur zwischen den aus Quarks aufgebauten Teilchen, den so genannten ▷

▷ Hadronen. Es ist die starke Kraft, die Atomkerne zusammenhält – ohne sie würden die Protonen im Kern aufgrund ihrer elektromagnetischen Abstoßung sofort auseinander fliegen.

Der Erfolg der Teilchenphysik fußt maßgeblich auf dem Zusammenspiel der Entwicklung von theoretischen Modellen und den Experimenten mit Teilchenbeschleunigern. Indem die Wissenschaftler die verschiedensten Partikel zusammenprallen lassen und ihre Wechselwirkungen genauestens analysieren, können sie Aufbau und Eigenschaften der fundamentalen Teilchen und Kräfte erforschen. Es ist allzu verständlich, dass die Teilchenphysiker immer weiter physikalisches Neuland erschließen wollen. Dazu brauchen sie größere Beschleuniger, die ihnen den Zugang zu noch höheren Energien ermöglichen.

Derzeit ist am Cern, dem Europäischen Laboratorium für Teilchenphysik in der Nähe von Genf, ein neuer Ringbeschleuniger im Bau. Dieser *Large Hadron Collider* (LHC) soll Protonen mit Protonen kollidieren lassen, die zuvor auf Energien im Teraelektronenvolt (TeV)-Bereich beschleunigt wurden. Des Weiteren gibt es Pläne für einen neuartigen Linearbeschleuniger, der Leptonen aufeinander schießen soll. Das deutsche Konzept Tesla (*TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator*) sieht einen 33 Kilometer langen Linearcollider mit integrierten Röntgenlasern vor. Die Beschleunigungsstrecke für Elektronen soll bei dem Forschungszentrum Desy in Hamburg beginnen, diejenige für Positronen bei Westerhorn im Norden des Kreises Pinneberg. In der Mitte der Strecke, in Ellerhoop, sollen die beiden Teilchenstrahlen aufeinander prallen. Dort sollen auch die Röntgenlaser aufgebaut werden. Deren Leuchtstärke soll bis zu einer Milliarde Mal höher sein als die bisheriger Röntgenanlagen – und das bei extrem kurzen Pulsdauern, die es ermöglichen, schnell ablaufende atomare Vorgänge im Film festzuhalten.

Beide Beschleuniger, sowohl LHC als auch Tesla, bedienen sich supraleitender Technologien, um die Teilchen auf hohe Energien zu bringen. Aber wie rechtfertigen die Forscher den immensen Aufwand für diese Großforschungsanlagen? Welchen Fortschritt erwarten sie durch die damit möglichen Experimente? Spektrum der Wissenschaft sprach mit Professor Albrecht Wagner, dem Vorsitzenden des Direktoriums des Forschungszentrums Desy.

INTERVIEW

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Wagner, warum ist eine neue Generation von Teilchenbeschleunigern nötig?

Professor Albrecht Wagner: Bisherige Experimente haben in glänzender Weise das Standardmodell der Teilchenphysik bestätigt, das von unglaublicher Präzision ist. Zugleich haben wir gesehen, dass zentrale Fragen noch unbeantwortet sind. Die gesuchten Antworten sind in einem Energiebereich zu finden, der erst mit einer neuen Generation von Beschleunigern zugänglich wird – sowohl mit dem LHC als auch mit einem Elektron-Positron-Collider.

Spektrum: Welche Fragen sollen mit diesen Anlagen beantwortet werden?

Wagner: Da ist zunächst einmal die Frage nach dem Mechanismus, mit dem die Teilchen zu ihrer Masse kommen. Die heute bevorzugte Vermutung ist die, dass die Teilchen im Universum eigentlich masselos sind, das Universum aber ausgefüllt wird von einem noch unbeobachteten Feld, dem Higgs-Feld, das durch diese masselosen Teilchen lokal verformt wird. Aus dieser Deformation erhielten die Teilchen ihre Massen, wie wir sie kennen.

Eine andere Frage ist: Gibt es einen Zusammenhang zwischen den vier Grundkräften? Oder, wenn Sie so wollen, mit den drei Grundkräften – wir wissen inzwischen ja, dass die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung sich in der elektroschwachen Kraft vereinigen lassen. Wir wollen in Erfahrung bringen, ob das auch für die anderen Kräfte gilt.

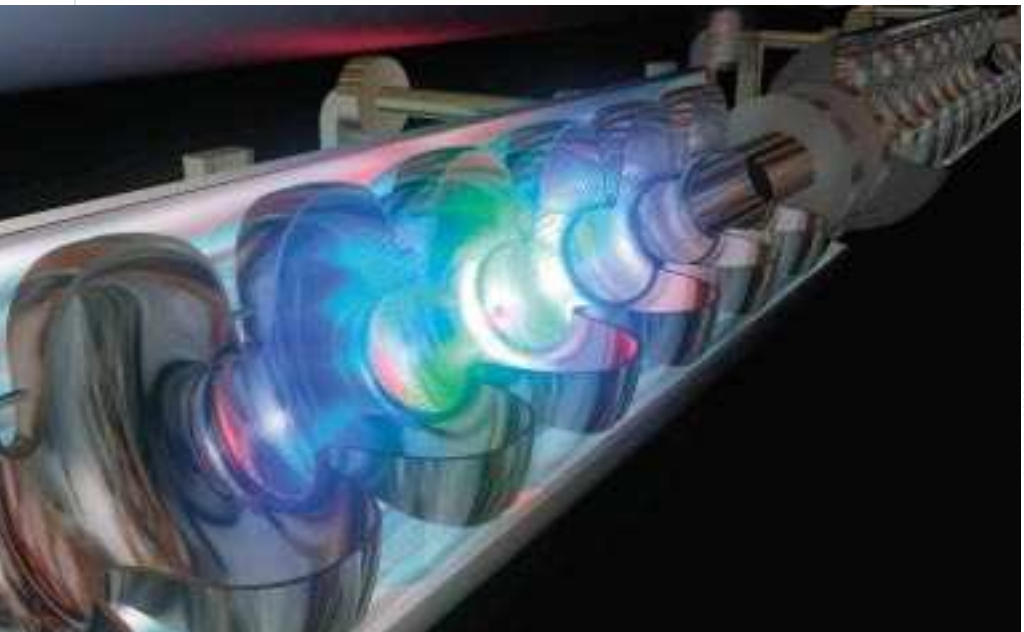
Spektrum: Also letztlich eine Vereinigung der Quantenphysik mit der Gravitation?

Wagner: Ja. In diesem Zusammenhang wird außerdem eine neue Symmetrieeigenschaft der Natur, die Supersymmetrie, diskutiert. Aus dieser Theorie folgt als experimentelle Konsequenz, dass es doppelt so viele elementare Teilchen geben sollte, wie wir sie heute kennen. Für jedes Teilchen mit Spin ½ – Quarks und Elektron beispielsweise – gibt es einen supersymmetrischen Partner mit ganzzahligem Spin. Und umgekehrt: Für jedes Kraftteilchen mit ganzzahligem Spin – Photon und Gluon etwa, die Trägerteilchen der elektromagnetischen und der starken Kraft – gibt es supersymmetrische Partner mit halbzahligem Spin. Damit wäre zugleich ein Zusammenhang zwischen den Masseteilchen und den Kraftteilchen hergestellt.

Außerdem: Das leichteste dieser noch hypothetischen supersymmetrischen Teilchen ist einer der besten Kandidaten für die Dunkle Materie im Universum. Die Astronomen haben ja herausgefunden, dass nur ein kleiner Teil der im All vorhandenen Gesamtmasse in Form von Sternen und anderen Himmelskörpern vorliegt. Woraus der überwiegende Rest besteht, ist rätselhaft. Die Teilchenphysiker werden dazu beitragen, dieses Rätsel zu lösen.

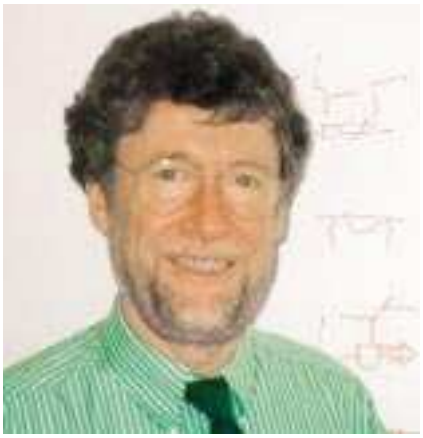
Spektrum: Und das können Sie mit LHC und Tesla?

Wagner: Um über Theorie und Spekulation hinauszukommen, brauchen wir Experimente, die uns genauere Informationen liefern. Mit dem LHC werden wir wichtige Antworten erhalten, wie auch in der Vergangenheit mit Proton-Beschleunigern. Das allein wird aber nicht ausreichen. Die Erfahrung zeigt, dass Positron-Elektron-



ALLE BILDER DIESES BEITRAGS: DESY HAMBURG

Elektromagnetische Felder in supraleitenden Resonatoren beschleunigen Elektronen auf höchste Energien.



Der Physiker Albrecht Wagner ist Vorsitzender des Direktoriums des Deutschen Elektronen-Synchrotrons Desy in Hamburg.

Maschinen wie Tesla ebenfalls eine ganz zentrale Rolle spielen.

Spektrum: Was ist der wesentliche Unterschied zwischen LHC und Tesla? Warum reicht eine Maschine nicht aus?

Wagner: Der Unterschied liegt in den Teilchen, die zusammenstoßen. Elektronen und Positronen sind Leptonen, also fundamentale Teilchen. Wir wissen genau, was kollidiert, und können darum das Endresultat ohne große Annahmen analysieren und genau verstehen. Wir können auch die Strahlenergie exakt variieren und präzise durch die Energieschwelle hindurchfahren, an der ein neues Teilchen erzeugt wird. Damit lassen sich dessen Masse und seine anderen Eigenschaften exakt bestimmen. Wir können auch gewisse Prozesse ein- und ausschalten, etwa indem wir Elektronen und Positronen polarisieren. Derartige Reaktionen sind also ein hochkontrolliertes, hochverstandenes System.

Protonen hingegen sind außerordentlich komplexe Gebilde, wie wir zum Beispiel aus den Experimenten an Hera bei Desy wissen. Wenn Sie ein Proton auf ein anderes Proton schießen, wissen Sie nicht, ob Quarks auf Antiquarks, Quarks auf Quarks, Gluonen auf Quarks oder Gluonen auf Gluonen prallen. Diese fehlende Kontrolle macht die Analyse sehr viel komplexer und schwieriger. Zudem gibt es viele Prozesse, die uns überhaupt nicht interessieren, die wir aber nicht abschalten können. Deshalb ist das Verhältnis von Signal zu Untergrund um viele Größenordnungen schlechter als bei Leptonen-Kollisionen. Die Messgeräte sind also immer voll mit Ereignissen, die uns stören. Hingegen sind bei Positron-Elektron-Collidern die interessanten Signale genauso unübersehbar wie der Mount Everest im Himalaja. Also eine ganz unterschiedliche Situation.

Spektrum: Warum beschränkt man sich nicht gleich auf Leptonen-Kollisionen?

Wagner: Elektronen sind nicht so einfach auf hohe Energien zu bringen wie Protonen. Mit Letzteren geht das leichter. Allerdings erkauft man sich diesen Vorteil durch ein viel komplexeres Umfeld, in dem das Extrahieren der Signale schwierig ist.

Spektrum: Es hat also jeder Beschleunigertyp seine Vor- und Nachteile?

Wagner: Ja. Vom Betrieb her und was man damit machen kann. Wollen Sie beispielsweise die supersymmetrischen Partner von Quarks und Gluonen untersuchen, nutzen Sie dazu besser eine Proton-Maschine. Die supersymmetrischen Partner der Leptonen wiederum lassen sich sehr viel leichter in einer Positron-Elektron-Maschine studieren. Beide Beschleunigertypen ergänzen sich hervorragend.

Spektrum: Ein konkretes Beispiel?

Wagner: Die Untersuchung der *Z*-Bosonen etwa begann mit einer Entdeckung am Proton-Antiproton-Collider im Cern. Aber wirklich im Detail gemessen und damit auch verstanden wurde das *Z*-Boson erst durch Experimente mit dem Beschleuniger Lep, der Elektronen auf Positronen schoss. Plakativ gesagt: Ein Hadron-Collider ist eine Entdeckungsmaschine, und ein Elektron-Positron-Collider eine Verständnis-Maschine. Deshalb ergänzen sich beide Typen in einer sehr guten und überzeugenden Weise. Ohne Lep würden wir im Verständnis des Standardmodells nicht so weit sein – trotz eines Tevatrons, das zu höheren Energien kommt.

Im Tevatron, dem Proton-Antiproton-Speicherring des Fermilab bei Chicago, konnten unsere Kollegen das top-Quark direkt messen. Mit Lep ging das nicht. Aber mit Lep war die Messung so genau, dass man aus indirekten Effekten eine Vorhersage für das top-Quark gemacht hat. Dies hat sozusagen eine Punktlandung für die Energie ermöglicht, bei der im Tevatron das top-Quark gemessen wurde.

Spektrum: Zu Tesla: Würde die Energie dieses Linearcolliders ausreichen, um Quanten- und Gravitationstheorie zu vereinigen?

Wagner: Nein – weil diese Vereinigung vermutlich in einem Energiebereich stattfindet, den niemand je erreichen wird. Aber: Wir wissen heute schon, dass ein wesentlicher Teil der supersymmetrischen ▷

Specials von
STERNE UND WELTRAUM

NEU im Abonnement

NEU
ab 04.03.2003
im Handel

Die viermal pro Jahr erscheinenden Specials berichten aus erster Hand von der Erforschung des Universums. Jedes der Hefte widmet sich einem anderen Forschungsschwerpunkt; für das Jahr 2003 werden dies noch sein: „Kometen und Asteroide“, „Europas neue Teleskope“ und „Der heiße Kosmos“. Da aktive Forscher aktuell über ihre Grundlagenforschung berichten, ergibt die Special-Reihe nach und nach ein umfassendes Gesamtbild unserer Auseinandersetzung mit dem Weltall.

Versäumen Sie also keine Ausgabe und holen Sie sich das Jahresabonnement (vier Ausgaben) von **SuW-Special** zum Inlandspreis inkl. Versand von € 29,60 (ermäßigt auf Nachweis € 25,60).

Eine Bestellmöglichkeit für das Einzelheft finden Sie auf dem hinteren Beihefter, eine Abo-Möglichkeit unter

www.suw-online.de

▷ Teilchen entweder mit LHC oder mit Tesla gesehen werden kann. Vorausgesetzt natürlich, die Natur hat sich nicht ein anderes Szenario ausgedacht als die Supersymmetrie. Mit der Entdeckung der ersten supersymmetrischen Teilchen ergäbe sich eine Situation wie in der Optik vor hundert Jahren: Als die Physiker anfingen, die ersten Spektrallinien zu vermessen, legten sie damit die Grundlagen für die Quantenmechanik. In der Teilchenphysik wird das ähnlich sein: Die Messung der ersten Teilchen in einem Massenspektrum wird die Grundlage für eine erweiterte Theorie der Teilchenphysik sein. Heute wissen wir schon aus Präzisionsmessungen mit Lep, dass die Masse des gesuchten Higgs-Teilchen mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 bis 95 Prozent unter 180 Gigaelektronenvolt liegen muss.

Spektrum: Lep hat ja auch Elektronen und Positronen beschleunigt, und zwar in einem Ring. Was ist der Vorteil der linearen Beschleuniger-Anordnung bei Tesla?

Wagner: Mit einem Ringbeschleuniger wie Lep kommen Sie nicht zu noch höheren Energien, weil die Elektronen auf der Kreisbahn Energie in Form von Synchrotronstrahlung abstrahlen. Wenn Sie mit Lep die Teilchenenergie hätten verdoppeln wollen, hätten Sie 16-mal mehr Energie reinstecken müssen, weil die Abstrahlung mit der vierten Potenz der Teilchenenergie ansteigt. Das wäre weder ökonomisch noch sinnvoll. Ferrari baut ja auch nicht starke Motoren, um dann das Auto mit angezogener Handbremse fahren zu lassen. Wenn Sie mit Elektronen 500 Giga- oder ein Teraelektronenvolt erreichen wollen, müssen Sie die Kreisbahn meiden und geradeaus gehen.

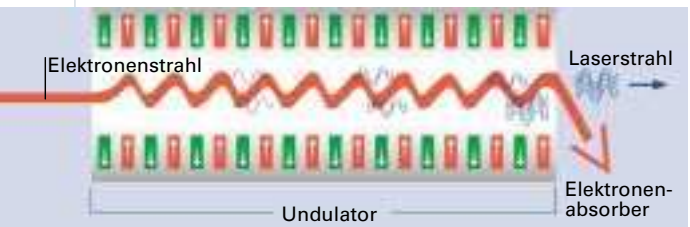
Spektrum: Die Synchrotronstrahlung ist einerseits unerwünscht wegen der Strahlungsverluste, andererseits hat sie auch ganz nette Anwendungen.

Wagner: Mehr als das. Tesla ist deshalb nicht nur ein Beschleuniger für die Teilchenphysik, sondern gleichzeitig auch ein Röntgenlaser. Wenn man sich überlegt, wie man die benötigten Ereignisraten bekommt, dann stellt man fest: Der Elektronenstrahl muss so fokussiert und pfleglich behandelt werden, dass er über die gesamte Beschleunigerstruktur hinweg eine hohe Qualität hat. Hat man aber erst einmal einen solchen Strahl und schickt ihn durch einen Undulator – eine Anordnung von Magneten, welche die Elektronen zu Schlingerbewegungen zwingen –, dann erhält man einen Röntgenlaser.

In Ellerhoop, in der Mitte der 33 Kilometer langen Tesla-Beschleunigerstrecke, soll ein Forschungsgelände mit unter- und oberirdischen Experimentierhallen entstehen. Das Röntgenlicht des freien Elektronenlasers wird fächerförmig zu den Messplätzen gelenkt.

Damit können wir vier Dinge erreichen, die mit heutigen Anlagen nicht möglich sind: Pro Laserpuls stehen zehn Milliarden Mal mehr Photonen zur Verfügung. Die Dauer des Pulses reduziert sich von vielen Pikosekunden auf unter hundert Femtosekunden; auf dieser Zeitskala laufen alle elementaren biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse in der Natur ab. Die Wellenlänge des freien Elektronenlasers können Sie durchstimmen, indem Sie die Energie der Elektronen variieren. Und die Strahlung ist kohärent. Dass dies alles erreichbar ist, konnte mit der Tesla-Testanlage bei Desy bewiesen werden.

Spektrum: Tesla ist also ungewöhnlich vielseitig, weil ich sowohl Teilchenphysik betreiben kann als auch eine hocheffiziente Synchrotronstrahlungsquelle habe?



Der selbstverstärkende Effekt des Röntgenlasers: Elektronen auf Schlingerkurs senden Photonen aus, die sich in Strahlrichtung mit den Elektronen überlappen und diese zwingen, im Gleichtakt zu schwingen.

Wagner: Genau. Der freie Elektronenlaser eröffnet völlig neue Perspektiven. Sie können Prozesse in ihrer zeitlichen Abfolge in atomarer Auflösung verfolgen, weil die Wellenlänge dieses Röntgenlasers bis zu 0,1 Nanometer reicht. Sie können damit den Aufbau von Biomolekülen sichtbar machen. Mit heutigen Verfahren bräuchten Sie einen Kristall, aber viele dieser Moleküle kristallisieren nicht. Mit dem neuen Laser können Sie ein einzelnes Eiweißmolekül ansehen und so viele Photonen daran streuen, dass Sie es abbilden und seine Struktur rekonstruieren können, bevor es Ihnen infolge der eingestrahlten Energie um die Ohren fliegt.

Spektrum: Es gibt weltweit ungefähr fünfzig Beschleuniger, die ebenfalls Synchrotronstrahlungsquellen sind. Der Vorteil von Tesla wäre nun die viel höhere Leuchtstärke und gleichzeitig der Lasereffekt?

Wagner: Leuchtstärke und Lasereffekt sind verschiedene Facetten ein und desselben Prozesses, der selbstverstärkten spontanen Emission. Ein Elektronenpaket, das auf einer Schlingerbahn durch den Undulator läuft, sendet Photonen aus. Diese wandern mit dem Teilchenbündel mit. Und da die Photonen an die Elektronen koppeln, entsteht im Elektronenpaket eine Substruktur, die wie ein Dipol wirkt. Dadurch nimmt die Intensität der Strahlung mit dem Quadrat der Ladung zu. Da ein Paket rund 10^9 Elektronen enthält, erhöht sich die Anzahl der Photonen auf das Milliardenfache. Durch die Wechselwirkung zwischen den Elektronen und den Photonen schwingen letztlich alle Elektronen im Gleichtakt, und die Strahlung ist kohärent.

Spektrum: Lassen sich an Tesla gleichzeitig Experimente zur Teilchenphysik und mit dem freien Elektronenlaser durchführen?

Wagner: Es ist beides parallel möglich. Im ursprünglichen Entwurf hat der Beschleuniger für die Teilchenphysik gleichzeitig auch die verschiedenen Laserstrahlen bedient. Wir haben inzwischen auf Empfehlung des Wissenschaftsrats das Konzept so geändert, dass der Laser seinen eigenen Beschleuniger bekommt. Das ist zwar teurer, aber beide Anlagen lassen sich flexibler nutzen. Die höheren Kosten fangen wir auf, indem wir die Zahl der Laserstrahlen in der ersten Projektphase verringern.

Spektrum: Gibt es international Konkurrenzprojekte zu Tesla?

Wagner: In Japan und in den USA gibt es Vorschläge, den Linearcollider mit einer anderen Technologie zu realisieren. Diese Studien haben vor etwa zehn Jahren be-

gonnen, als man supraleitende Beschleuniger für viel zu teuer hielt. Das hat sich als nicht richtig erwiesen. Die Kosten sind also kein zentrales Argument für die Auswahl einer bestimmten Technologie. Andererseits hat sich gezeigt, dass die Supraleitung die leistungsfähigere Technologie ist.

Spektrum: Steht der Standort Schleswig-Holstein schon fest?

Wagner: Wir schlagen diesen Standort vor, und das ist auch in Europa der einzige, der diskutiert wird. Aber im Grunde ist Tesla auch woanders denkbar. Die Teilchenphysiker sind sich weltweit einig, dass eine solche Anlage notwendig ist. Nun müssen sie sich auf eine Technik einigen. Dann können sie zu den Politikern gehen und sagen: Alle wollen das, jetzt bitte sagt, ob ihr nicht nur beteiligt sein, sondern auch als Sitzland eine zentrale Rolle übernehmen wollt. Denn das Sitzland sollte einen größeren Teil der Kosten übernehmen.

Spektrum: Wie lange würde es dauern, bis Tesla einsatzbereit wäre?

Wagner: Die Bauphase dauert acht Jahre. Die Hälfte davon ist Infrastrukturarbeit wie das Bohren des Tunnels. Der Rest wird für den Aufbau der Maschine gebraucht. Mit dem Laser könnten wir wohl nach sechs Jahren erste Gehversuche machen, in der Teilchenphysik nach acht Jahren. Die Inbetriebnahme wird etwa ein Jahr erfordern. Also frühestens 2012 könnten wir die ersten wirklichen Daten aufnehmen.

Spektrum: Was würde es bedeuten, wenn Tesla nicht gebaut würde?

Wagner: Das wäre ein dramatischer Verlust für die Teilchenphysik. Ich rede jetzt noch nicht mal von Tesla in Hamburg, sondern generell von einem Positron-Elektron-Collider irgendwo auf der Welt. Ohne ein solches Werkzeug würde ein absolut wesentliches Element fehlen, um die eingangs diskutierten Fragen zu verstehen.

Spektrum: Wenn Tesla gebaut wird, heißt das aber nicht, dass dann Hera oder andere Beschleuniger überflüssig wären?

Wagner: Hera wird voraussichtlich Ende 2006 seine Aufgabe erfüllt haben. Das Wissen wird sich dann mit dieser Maschine nicht weiter steigern lassen. Außerdem: Man muss auch etwas zumachen, wenn man was Neues anfängt. Das passt alles zeitlich sehr gut zueinander. Der LHC hat eine ganz klare Aufgabe, die sich mit Tesla gut ergänzen würde. Und das sind die beiden einzigen konkreten großen Beschleunigerprojekte. Alle anderen sind in einer frühen Ideenphase, wo man noch gar nicht über ein Projekt reden kann. ◁

KOMMENTAR

Regime-Wechsel

Die Irak-Krise zeigt, wie sich Strukturen zur Konfliktbewältigung auflösen.

Pervers, aber simpel – so erscheint uns im Rückblick die Logik der nuklearen Abschreckung während des Kalten Krieges. Nicht weniger bedenklich, aber weitaus komplexer stellt sich die aktuelle sicherheitspolitische Lage dar. Denn mehrere zusätzliche Dimensionen haben das Regime der Rüstungskontrolle und der Krisenbewältigung verändert. Sie bedrohen die internationale Gemeinschaft nicht minder wie einst der Ost-West-Konflikt.

Art und Anzahl der Akteure: Konfliktparteien sind nicht mehr nur Staaten, sondern auch nichtstaatliche Akteure wie Freischärler, Rebellen, Terroristen. Damit ist Rüstungskontrolle als stabilisierendes Instrument in ihren Grundzügen in Frage gestellt. Mit wem soll man verhandeln, mit wem Verträge schließen, wenn es keine ausreichend definierten Parteien gibt und sich ein Teil der Akteure außerhalb jeder völkerrechtlichen Konvention bewegt?

Terrorismus: Fanatische Selbstmordattentäter bedrohen alle Nationen, alle Kulturen. Ihnen ist mit herkömmlichen Streitkräften nicht beizukommen – weder die Ausrüstung noch die veralteten Denkstrukturen eignen sich dazu. Versuche, durch Konfliktlösung dem Terrorismus die Basis zu entziehen, sind höchstens in Ansätzen zu erkennen.

Massenvernichtungswaffen: Pakistan, Indien und Israel haben inzwischen Kernwaffen entwickelt. Weitere Länder streben dies an, wie der Irak, der Iran und Nordkorea. Selbst Japan behält sich – trotz leidvoller Erfahrungen mit Hiroshima und Nagasaki – eine nukleare Option vor. In Russland lagern zehntausende Tonnen von chemischen Waffen in zum Teil unzureichend gesicherten Arsenalen; ihre Vernichtung geht nur schleppend voran.

USA: Die Regierung unter George W. Bush hat einen dramatischen Wechsel der US-Sicherheitsdoktrin beschlossen – und das bereits vor den Ereignissen des 11. September 2001. Demnach soll die militärische Überlegenheit der USA weiter ausgebaut werden. Internationale Verträge, die eigene Rüstungsprojekte behindern könnten, wurden gekündigt, neue Abkommen blockiert.

Was gegenwärtig in der Golfregion passiert, ist ein kompliziertes Geflecht aus diesen Faktoren – wobei noch weitere hinzukommen wie die Ausdehnung geopolitischer Interessensphären, die Bewahrung der israelischen Überlegenheit in der Region und der Zugriff auf die Ölfelder des Iraks. Mit Terrorismusbekämpfung hat der Aufmarsch der US-Truppen absolut nichts zu tun. Für die anfängliche Argumentation, Saddam Hussein unterstütze El Kaida, gibt es keinerlei Belege.

Vordergründig geht es nun darum, die Produktion von Massenvernichtungswaffen zu verhindern. Doch auch die Dossiers, mit denen verbotene Aktivitäten des Iraks bewiesen werden sollten, enthielten außer längst Bekanntem nur Spekulationen. Allein die Inspektoren der Vereinten Nationen und der Internationalen Atomenergiebehörde können hier Klarheit schaffen. Und dem UN-Sicherheitsrat muss es vorbehalten bleiben, die Befunde nach sachlichen Kriterien zu bewerten.

Wenn die internationale Gemeinschaft einen Rest an verbindenden und verbindlichen Strukturen zur Konfliktbewältigung erhalten will, dann dürfen militärische Aktionen nur als letztes Mittel zur Durchsetzung stabilisierender Maßnahmen und nur unter UN-Mandat durchgeführt werden.

Zwar ist ein Regimewechsel im Irak aus vielerlei Gründen wünschenswert. Doch ihn militärisch von außen erzwingen zu wollen unter falscher Legitimation, wäre nur schwer in Einklang zu bringen mit den mühsam erarbeiteten Prinzipien des Völkerrechts. Wenn die demokratisch-freiheitliche Welt glaubwürdig bleiben will, darf sie keine Bomben werfen, sondern muss mit Vernunft und Diplomatie zu einem gemeinsamen System der Rüstungskontrolle zurückkehren.

Uwe Reichert

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

HIRNFORSCHUNG

Manfred Spitzer

Lernen

Gehirnforschung und die Schule des Lebens

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2002. 511 Seiten, € 29,95

Nachdem am 26. April 2002 ein Erfurter Schüler 16 Menschen und dann sich selbst erschossen hatte, wurde viel darüber diskutiert, ob der übermäßige Konsum gewalttätiger Videospiele die Tat mit angeregt haben könnte. Die Befragten waren meist Vertreter der betroffenen Interessenverbände, Wissenschaftler waren selten darunter. Dabei zeigen Untersuchungen schon seit Jahrzehnten eindeutig, dass es Menschen, und vor allem Heranwachsende, gewalttätiger macht, wenn sie viel Gewalt im Fernsehen beobachten, und dass dieser Zusammenhang noch stärker für Videospiele gilt.

Lernen ist eine – vielleicht die wichtigste – Leistung des Gehirns. Seine Gesetzmäßigkeiten sind mit naturwissenschaftlichen Methoden ergründbar, und das längst nicht mehr nur bei Ratten, sondern, mit bildgebenden Verfahren, epidemiologischen Studien und Feldversuchen, auch unmittelbar am Menschen. Die Ergebnisse dieser Forschung kann man in der Pädagogik anwenden – und sollte es auch. Diese Verbindung von Neurobiologie und Schule, seit einigen Jahren als »Neurodidaktik« im Gespräch, ist das Hauptanliegen von Manfred Spitzer in diesem Buch.

Natürlich arbeiten Lehrer mit Menschen, nicht mit Gehirnen, und die erforderliche Menschenkenntnis kommt nicht von einer Fortbildung in Neurobiologie. Aber die Kenntnis des Gehirns kann uns recht gute Anhaltspunkte dafür geben, was in der Ausbildung und Bildung junger Menschen in Deutschland falsch läuft und wie man es besser machen könnte – die Pisa-Studie und jüngere Untersuchungen mit ähnlichen Ergebnissen haben uns die Defizite drastisch vor Augen geführt. Wenn man sich etwa klar macht, dass das Gehirn ununterbrochen lernt und nicht etwa beim Erschallen der Schulklingel am Mittag damit aufhört, wird man der außerschulischen Umwelt mehr Aufmerksamkeit schenken. Wenn man versteht, wie Motivation funktioniert, wird man sich als Lehrer damit mehr Mühe geben. Wenn man weiß, dass Werte sich nicht durch Predigten, sondern durch Handeln im Nervensystem verfestigen, wird man Jugendlichen mehr Gelegenheit zu Interaktion und verantwortlichem Tun geben. Und so weiter.

Gewaltdarstellung im Fernsehen macht gewaltbereit

Spitzer stellt diese Zusammenhänge sehr systematisch dar. Zu Anfang beschreibt er das Lernen auf der Ebene von Synapsen, Neuronen und kortikalen Arealen, doch stets mit Blick auf das Gesamte. Dann erklärt er, wie Aufmerksamkeit, Gefühle und Motivation das Lernen beeinflussen, verfolgt die Lernfähigkeit anschließend durch ihre Reifung über die Lebensalter hinweg, ehe er, auf allem Vorherigen aufbauend, Aussagen wagt über die Entwicklung von Sozialverhalten und moralischen Werten. Spitzer greift dafür auf eine große Zahl meist ganz junger Veröffentlichungen zurück, nicht nur aus den Neurowissenschaften, sondern auch aus Psychologie, Soziologie, Ethnologie und Wirtschaftswissenschaften.

Wenn Naturwissenschaftler sich auf geisteswissenschaftliches Terrain vorwagen, kommt es allzu oft aus Unverstand zu einer arroganten Landnahme mit plump biologistischen Übergriffen. Vor diesem Fehler wird Spitzer, der heute Professor für Psychiatrie in Ulm ist, durch seine Ausbildung bewahrt, denn neben einer Promotion in Medizin und einem Diplom in Psychologie verfügt er auch über einen zweiten Doktor in Philosophie. Überdies hat er fünf Kinder, was für das Thema Erziehung wahrscheinlich die beste Qualifikation ist. Spitzer weiß also, worüber er sich äußert. Er kennt die besonderen Probleme der verschiedenen Fächer und vermag ihre Darstellung fließend miteinander zu verknüpfen, ohne dass man je den Eindruck hat, er stehe auf wackligem Grund.

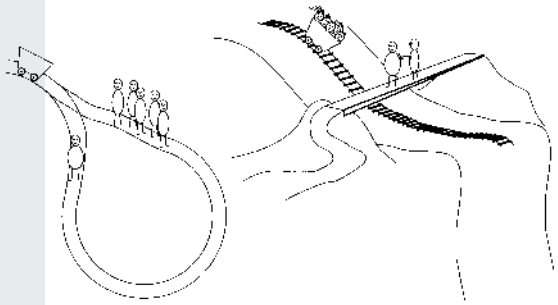
Wie man etwas beibringt, weiß Spitzer zudem nicht nur in der Theorie: Er kann es selbst ganz vorzüglich. Sein Stil ist klar, erklärend, bild- und beispielreich, oft geistreich. Er nimmt seinen Leser ernst und fordert ihn, ohne ihn zu überfordern. Bisweilen erläutert er methodische Fragen, wo es interessant ist, und gibt seiner Freude über raffinierte Versuchsaufbauten Ausdruck. Wissenschaft ist bei ihm spannend. Während viele Bücher über das Gehirn vor allem Verblüffung über die vielen tollen Dinge vermitteln, die Neuroforscher heute können und wissen, erklärt Spitzer immer auch die Bedeutung der Ergebnisse. Kontroversen innerhalb der Wissenschaft verheimlicht er nicht, sondern bezieht selbst klar und gut begründet Stellung. Es ist ein ungemein kluges und vernünftiges Buch.

Bei all dem Lob sei ein Makel nicht verschwiegen: Das Buch wurde in großer Eile veröffentlicht – immerhin werden die gerade erst veröffentlichte Shell-Studie 2002 und das Elbehochwasser erwähnt. Da hat die editorische Sorgfalt gelitten. Schätzungsweise ein Drittel der Arbeiten, die im Text zitiert werden, fehlt im Literaturverzeichnis. Die Entdeckung von Mitosen im Gehirn erwachsener Nagetiere wird der Arbeitsgruppe Kempermann 1997 zugeschrieben – es waren Joseph Altman und Gopal Das im Jahr 1965. Diese Zellteilungen finden auch nicht nur bei Tieren in reizreicher Umwelt statt, und die in diesem Zusammenhang zitierte Autorin heißt Gould, nicht Gold.

Dabei hat es das Buch gar nicht nötig, um Aktualität zu buhlen. Was es über das Lernen aussagt, über die Erziehung, die Bildung von Werten, die Mängel unseres Erziehungssystems, wird noch lange gültig bleiben. Gerade unter Eltern, Erziehern, Lehrern und Schulpolitikern sind ihm viele Leser zu wünschen.

Konrad Lehmann

Der Rezensent ist promovierter Neuroanatom und arbeitet an der Universität Bielefeld über die Entwicklung der Gehirnstruktur von Säugetieren.



Im Labor wird untersucht, welche Hirnregionen an Entscheidungen in moralischen Dilemmata beteiligt sind. Die Versuchsperson wird gefragt, ob sie die Weiche so stellen würde, dass nur ein Mensch überfahren wird statt fünf (links), oder ob sie einen Menschen von der Brücke stoßen würde, um damit das Leben von fünfen zu retten (rechts).

BOTANIK

Helmut Baumann und Theo Müller

Farbatlas Geschützte und gefährdete Pflanzen

Ulmer, Stuttgart 2001. 317 Seiten, € 24,90

Um Gestalt und Form einer Pflanze wirklich erfassen zu können», so Jean-Jacques Rousseau (1712–1788), »muss man sie unbedingt zuerst an ihrem Standort gesehen haben.« Herbarien, so führt der Philosoph und Schriftsteller in seinen berühmten »botanischen Lehrbriefen« weiter aus, sind zwar als »Gedächtnisstütze sehr dienlich«, aber nur für den, der die Pflanzen zuvor in »frischem Zustand« gesehen hat. Da ist ein Fotobildband weitaus besser als ein Herbarium, denn er fängt zumindest etwas von jener Frische der lebendigen Natur ein – zumal bei so hervorragenden Fotos wie denen von Helmut Baumann.

Über tausend heimische Farn- und Blütenpflanzen gehören zu den gefährdeten und geschützten Arten. Das ist mehr als ein Viertel aller in Deutschland vorkommenden Höheren Wildpflanzen. Der Apotheker und bekannte Pflanzenfotograf Helmut Baumann und der Botaniker Theo Müller haben in ihrem handlichen Buch eine Auswahl von 527 Pflanzen abgebildet und beschrieben. Die vollständige Artenliste wird in tabellarischer Übersicht präsentiert, unter Angabe von Gefährdungsgrad und Schutzstatus jeder Pflanze.

Die Autoren informieren in einem Einleitungskapitel zunächst über die historischen Anfänge des Naturschutzgedankens und klären über die gesetzlichen Grundlagen des botanischen Artenschutzes sowie die Gefährdungskategorien und -ursachen auf. Im Hauptteil werden die abgebildeten Pflanzen sodann durch kurze Texte zu den Stichworten »Biologie«, »Vorkommen« sowie »Gefährdung/Schutz« charakterisiert.

Insbesondere die präzisen Angaben über Gefährdung und Schutz sind für den Naturschützer vor Ort von großem Wert. Denn sie vertiefen das eigene Verständnis für ökologische Zusammenhänge und bieten Argumentationshilfen, um Menschen vom Naturschutz im konkreten Fall zu überzeugen.

Schließlich geht es – wie Loki Schmidt, die Ehefrau des Altkanzlers, im Geleitwort betont – doch vor allem darum, möglichst vielen Menschen die Augen zu öffnen »über die noch vorhandene Vielfalt und Schönheit unserer heimischen, gefährdeten Pflanzenwelt«.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und freier Journalist in Celle.

Der Blaue Sumpfstern *Swertia perennis* liebt mooriges Gelände. Durch Entwässerungen gefährdet.

Der Gelbe Günsel *Ajuga chamaepitys* wächst heute vorzugsweise an offenen, konkurrenzarmen Stellen.

TECHNIK

Harald Frater (Hg.)

Rekorde der Technik

CD-Rom. Springer, Berlin 2002. € 34,95

Wie hoch ist der höchste Wolkenkratzer? Wie schnell das schnellste Flugzeug? Und wo hängt die längste Hängebrücke? Die Antworten darauf und eine weitere umfassende Auswahl von Meisterleistungen der Technik präsentiert diese CD-Rom, angefangen bei dem vorgeschichtlichen Monument Stonehenge bis hin zum geplanten größten Schiff der Welt.

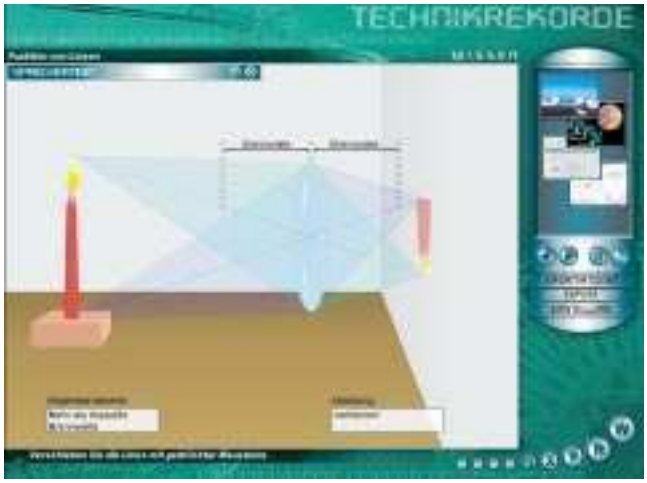
Landfahrzeuge, Schiffe, U-Boote, Luft- und Raumfahrzeuge, Wolkenkratzer, Brücken und Tunnel, Kraftwerke, Roboter und Maschinen, Computer und Kommunikationsmittel, Fernrohre und Mikroskope sowie Uhren und Messgeräte: Das ist das Panorama, das zum Programmstart geboten wird (Bild nächste Seite, links). Ein Klick auf eines dieser Bildchen, und schon ist man im zugehörigen Themenbereich der »Rekorde«. Neben diesem Menüpunkt stehen »Wissen«, »Zeitleiste« und ein »Quiz« zur Auswahl.

»Wissen« vermittelt dem Benutzer sehr anschaulich Grundlagen in den Gebieten »Bauen«, »Schwimmen und Tauchen«, »Fahren«, »Fliegen«, »Messen«, »Sehen«, »Kommunizieren«, »Energie« sowie »Bewegen und Arbeiten«. Spaß machen die eingebauten interaktiven Möglichkeiten; so gibt es im Bereich »Sehen« eine Linse, die eine Kerze auf eine Wand abbildet. Die Linse lässt sich verschieben, sodass das Bild der Kerze an der Wand größer oder kleiner wird (Bild nächste Seite, rechts).

Die »Zeitleiste« ermöglicht die chronologische Einordnung der Rekorde. Und wer das alles durchgearbeitet hat, weiß wahrscheinlich die richtigen Antworten auf die 250 kniffeligen Fragen im »Quiz«.

Die CD-Rom scheint auf den ersten Blick sehr gut gemacht. Die Möglichkeiten des Mediums wurden gut genutzt. Leider sind die Informationen unvollständig, allzu knapp und manchmal sogar falsch.

So wird neben all dem Großen und Schnellen dem Kleinen zu wenig Platz eingeräumt. Da wird kein Byte über die beachtlichen Leistungen verloren, die zu Mikrochips geführt haben, auch die Nanotechnologie bleibt unerwähnt. Das Kleins- ▷



Links das Eröffnungsmenü, rechts die interaktive Sammellinse

te, was ich gefunden habe, ist ein centgroßer Roboter.

Die Informationen zu den einzelnen Rekorden sind oberflächlich. Meist wird man mit zwei bis vier Sätzen abgespeist, manchmal sind es auch sechs. So entsteht der Eindruck, man blättere auf etwas umständliche Art und Weise in einem Bilderbuch mit kurzen Bildunterschriften. Ich hätte gerne gewusst, worin die eigentliche Leistung für den Rekord lag und welche Schwierigkeiten zu überwinden waren.

Besonders unseriös wirkt, wenn Planspiele von fantasiebegabten Ingenieuren nicht deutlich als solche gekennzeichnet werden. Das größte Schiff der Welt ist angeblich die »Freedom«; dass es sich um einen Entwurf handelt, der erst 2015 realisiert werden soll, muss man aus dem Text und der Zeitleiste mühsam erschließen. Wie schnell solche Planungen überholt sind, zeigt sich beim Lasten-Luftschiff Cargo Lifter 160, den es vermutlich nie geben wird, da das Unternehmen inzwischen Konkurs anmelden musste.

Sogar Fehler finde ich. So wird das Brennstoffzellenfahrzeug NECAR 5 gezeigt und behauptet, es werde mit flüssigem Wasserstoff betrieben. Stimmt nicht, es gewinnt den Wasserstoff aus Methanol. Das steht sogar auf dem abgebildeten Fahrzeug: »methanol powered fuel cell car«. Dann fällt auf, dass der Titel »Rekorde der Technik« in den Menüs »Technikrekorde« heißt – da ist wohl der alte Arbeitstitel stehen geblieben –, und spätestens dadurch wird klar, dass diese CD mit wenig Sorgfalt gemacht wurde.

Würde ich diese Scheibe verschenken? Na ja, dem Spieltrieb wird einiges geboten, im Bereich »Wissen« stecken viele gute Ideen, doch sicherlich würde mir für eine Freundin oder einen Freund etwas Besseres einfallen.

Bernhard Gerl

Der Rezensent arbeitet als freier Lektor und Autor in Regensburg.

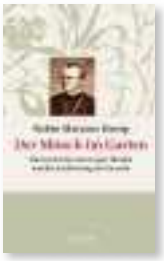
GESCHICHTE DER GENETIK

Robin Marantz Henig

Der Mönch im Garten

Die Geschichte des Gregor Mendel und die Entdeckung der Genetik

Aus dem Amerikanischen von Andrea Stumpf und Gabriele Werbeck.
Argon, Berlin 2001. 375 Seiten, € 20,40



Angesichts der spektakulären Erfolge der modernen Gentechnik mag es verdienstvoll sein, einen genaueren Blick auf die Anfänge zu werfen, auch wenn diese in groben Zügen in fast jedem Schulbuch nachzulesen sind: Vor fast 150 Jahren kreuzte der Augustinermönch Gregor Johann Mendel im Garten des Klosters St. Thomas im damals mährischen Brünn acht Jahre lang Erbsen und wurde mit seiner akribischen Versuchsstatistik zum Wegbereiter der Vererbungswissenschaft.

Die renommierte amerikanische Wissenschaftsjournalistin Robin Marantz Henig taucht mit der vorliegenden Darstellung einfühlsam in das Leben Mendels ein. Der mittellose Bauernbub entschloss sich auf Drängen eines Lehrers, ins Kloster zu gehen, und wurde schließlich dessen Abt. Der fleißige, glücklich experimentierende Mönch war eine eher etwas schrullige Persönlichkeit und keineswegs der wissenschaftliche Heros, zu dem ihn manche Nachbetrachtung aus dem frühen 20. Jahrhundert stilisierte.

An Material standen der Autorin nur zwei ältere Biografien zur Verfügung (Hugo Iltis, »Gregor Johann Mendel«, Berlin 1924, und Vítězslav Orel, »Gregor Mendel: The First Geneticist«, Oxford 1996) sowie etwa ein halbes Dutzend erhaltener Briefe an den Münchener Botaniker Carl von Nägeli. Denn nach Mendels Tod ließ dessen Nachfolger auf dem Abtstuhl, da auch die nächste Verwandtschaft kein Interesse anmeldete, den gesamten Nachlass auf dem Klosterhof verbrennen. Zwangsläufig musste Henig große Lücken in den Quellen durch interpretierende Nacherzählungen überbrücken.

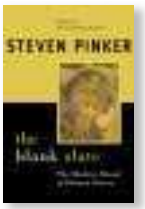
Die Lebensgeschichte Mendels, dem zu Lebzeiten die Anerkennung der Fachwelt nahezu völlig versagt blieb, füllt etwas mehr als die Hälfte des Buches. Der zweite, nicht minder aufschlussreiche Teil behandelt die Rezeptionsgeschichte des unterdessen berühmten, 1865 in den »Verhandlungen« des Naturwissenschaftlichen Vereins von Brünn erschienenen Aufsatzes »Versuche über Pflanzenhybriden«. Unter anderem aus dem Verbleib der elf heute noch lokalisierbaren Sonderdrucke der Veröffentlichung, die Mendel seinerzeit an seine Korrespondenzpartner versandt hatte, rekonstruiert Henig die genaueren Umstände der (angeblichen) Wiederentde-

ckung der Mendel'schen Befunde durch die erbitterten Konkurrenten Hugo de Vries, Carl Correns und den heute eher als Randfigur eingeschätzten Erich von Tschermak. Dieser Buchteil – von der Autorin ausdrücklich als zweiter Akt im Lebensdrama von Mendel bezeichnet – beleuchtet insbesondere die weitgehend unterschätzte Rolle des britischen Zoologen William Bateson (1861–1926), der für die Verbreitung der Mendel'schen Befunde deutlich mehr geleistet hat als alle Experimentatoren, die um 1900 Kreuzungen mit Nachtkerzen, Lichtnelken, Leinkraut oder Goldlack durchführten. Hugo de Vries beispielsweise erwähnt Mendel lediglich in einer Fußnote. Hervorhebenswert sind in diesem Kontext die zahlreichen begriffsgeschichtlichen Notizen zum heute üblichen klassisch-genetischen Fachvokabular, das Mendel so noch nicht benutzte, aber der Bedeutung nach zweifelsfrei vorweggenommen hat.

Das Buch ist eine recht gelungene Mischung aus Wissenschaftsroman und Sachdarstellung, flüssig geschrieben, ausgesprochen unterhaltsam und vielfach angereichert mit mancherlei Anekdoten oder Episoden. So erfährt der erstaunte Leser, dass Gregor Mendel vor seinen Erbsenkreuzungen zunächst einmal Mäuse züchtete. Es lebt von der Authentizität einer erneuten Recherche am Originalschauplatz Brno und zu einem nicht geringen Teil auch von der Qualität der Übersetzung, selbst wenn diese gelegentlich die Begriffe Hülse und Schote verwechselt.

Bruno P. Kremer

Der Rezensent lehrt am Institut für Biologie und ihre Didaktik der Universität zu Köln.



KOGNITIONSFORSCHUNG

Steven Pinker

The Blank Slate

The Modern Denial of Human Nature

Viking Press, New York 2002. 528 Seiten, $ 27,95

Der Kognitionspsychologe Steven Pinker, im Hauptberuf Chef des interdisziplinären Department for Brain and Cognitive Sciences am renommierten Massachusetts Institute of Technology (MIT), ist die Galionsfigur populärer Wissenschaftsliteraten. Mit wehenden Locken, Cowboystiefeln und samtener Stimme schreitet er voran, im Tross Koryphäen wie den Darwinisten Richard Dawkins oder den Kosmologen Brian Greene.

Sein Spezialgebiet ist die Natur des menschlichen Geistes. Sein populäres Erstlingswerk über die genetischen Wurzeln der Sprache, »Der Sprachinstinkt« (1994), verkaufte sich wie warme Semmeln, ebenso das vor fünf Jahren erschienene »Wie das Denken im Kopf entsteht« (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/1998, S. 122, und 5/1999, S. 150). Mit solchen Erfolgen im Rücken kann sich Pinker auch einen Flop leisten. Die halbe Million Dollar, die er für das Spezialistenwerk »Wörter und Regeln – Die Natur der Sprache« (1999) als Vorschuss erhielt, spielte der Verlag nie wieder ein.

In seinem neuen, wieder bestsellerverdächtigen Traktat will Pinker aus unseren Gehirnen ein Gespenst austreiben, das trotz jahrelanger Missionsarbeit in den Köpfen etlicher Intellektueller spuke: den Glauben an die Tabula rasa, der besagt, nicht biologische Anlagen, sondern allein die Gesellschaft präge den Menschen. Besonders extrem wird diese Position im Behaviorismus vertreten, dessen Begründer John B. Watson (1878–1958) behauptete, er könne ein jedes Baby »dazu trainieren, jegliche Art von Spezialist zu werden – Arzt, Anwalt, Künstler, Geschäftsmann, selbst Bettler oder Dieb, ungeachtet seiner Talente, Neigungen, seiner Berufung und der Rasse seiner Vorfahren«.

Der ungarische Psychopädagoge Lászlo Polgar hat das am eigenen Beispiel zu beweisen versucht. Vor über dreißig Jahren nahm er sich mit seiner Frau zusammen vor, sechs Kinder zu zeugen und weitere sechs zu adoptieren, um die Einflüsse von Vererbung und Erziehung auf die Intelligenz von Kindern abzuklären. Ihr Wunsch war, zwölf Wunderkinder in der Familie zu haben. Das Experiment glückte, wenn auch nur mit einem Viertel der geplanten Kinderzahl. Die Eltern Polgar haben drei Mädchen, die allesamt zu Meistern des Schachbretts herangezogen wurden.

Aber diesem Einzelfall zum Trotz findet Watsons reichlich siebzig Jahre alte These unter Wissenschaftlern inzwi- ▷

(Seiten 92 bis 94: Anzeige und Beihefter)

Lernen
– wie funktioniert das?

Bereits über 8.000 verkaufte Exemplare !

NEU!

Manfred Spitzer
■ **Lernen**
Wir lernen nicht nur in der Schule, sondern vor allem im Leben. Es geht nicht um Büffeln und Tests, sondern um Fähigkeiten und Fertigkeiten, die wir zum Leben brauchen. Lernen ist die natürliche und nicht zu bremsende Lieblingsbeschäftigung unseres Gehirns. Wie unsere „Lernmaschine im Kopf" arbeitet und wie wir sie mit Lernerfolg – und auch Vergnügen – arbeiten lassen können, das vermittelt dieses spannende Buch des Psychologen, Philosophen und Medizinprofessors Manfred Spitzer.
2002, 500 S., geb. € 29,95,
ISBN 3-8274-1396-6

aktuelle Lesetipps!

Manfred Spitzer
■ **Geist im Netz**
Dieses Buch richtet sich an Leser, die ihren Kopf nicht nur benutzen, sondern auch verstehen wollen. Es lädt dazu ein, den Gehirnzellen bei ihren Aktivitäten zuzuschauen und ihren Funktionsgesetzen nachzuspüren. Dabei erweist sich die Auseinandersetzung mit den neuronalen Grundlagen des Denkens als spannende Entdeckungsreise in den menschlichen Alltag.
2000, 385 S., br. € 14,95,
ISBN 3-8274-0572-6

Paul M. Churchland
■ **Die Seelenmaschine**
Unser Denken, unsere Gefühle, unser Selbstbewusstsein – sind unsere geistigen Aktivitäten, physikalische Zustände, und können sie letztlich in physikalischen Begriffen beschrieben werden? Paul M. Churchland tritt überzeugt für diese provozierende These ein.
396 S., 90 Abb.
Geb.: € 29,95, *ISBN 3-8274-0125-9*
Br.: € 14,95, *ISBN 3-8274-1020-7*

www.spektrum-verlag.de

! Bestellen können Sie mit der Bestellkarte vorne im Heft.
Oder: per Tel. 07071-935369, per Fax: 07071-935393
oder per Mail: shop@spektrum-verlag.de

Spektrum AKADEMISCHER VERLAG

schen keine Anhänger mehr. Der zwei Jahrzehnte alte Streit um den übermächtigen Einfluss der Umwelt, ausgefochten zwischen Evolutionspsychologen einerseits und Gesellschaftswissenschaftlern und Intellektuellen alter Schule andererseits, ist im Wesentlichen erledigt. Prominente Streiter von einst, wie Richard Lewontin oder der kürzlich verstorbene Stephen Jay Gould, haben sich dazu in den letzten Jahren kaum noch zu Wort gemeldet. Den Gegner, den sich Pinker aufbaut, gibt es eigentlich nicht mehr – was der auf gezielte Fragen hin auch halbwegs eingesteht.

Seine bilderstürmerische Attitüde wirkt für Außenstehende besonders amüsant, gehört er doch selbst zur Truppe jener Forscher, die der Öffentlichkeit eine neue Religion erfolgreich verkündet – aber diesmal die der Genetik: »Der Geist ist ein Produkt des Gehirns, das Gehirn verdankt seine Struktur zum Teil dem Genom, und das Genom hat seine Gestalt durch natürliche Selektion erhalten.« Ihn und seine Kollegen umflort sogar ein fast heiliger Glanz, so als würden sie einer Aussage des Physikers und Naturphilosophen Carl-Friedrich von Weizsäcker aus dem Jahre 1958 erst ihre volle Gültigkeit verleihen: »Der Wissenschaftler rückt ungewollt in die Rolle eines Priesters dieser säkularen Religion. Er verwaltet ihre Geheimnisse, ihre Prophetie, ihre Wunder.«

DONNA COVENEY

Steven Pinker und seine Kollegen umflort ein fast heiliger Glanz, als wären sie ungewollt Priester einer säkularen Religion

Blickt man jedoch hinter diesen Schaukampf ohne Gegner, so wirft Pinkers Werk spannende Schlaglichter auf unsere Psyche. So nimmt er treffend den Glauben vieler Eltern aufs Korn, ihre Erziehung präge die Sprösslinge stark. Die Wirklichkeit sieht indes anders aus. Studien belegen, dass unser Erbgut zu Persönlichkeit und Intelligenz ungefähr die Hälfte beiträgt. Eineiige Zwillinge, die in getrennten Familien aufwachsen, haben jede Menge bemerkenswerter Gemeinsamkeiten: Sie erzielen ähnliche Ergebnisse bei Persönlichkeitstests, teilen ihren Musikgeschmack, politische Ansichten und vieles mehr. Erziehungsexperten folgern daraus, die anderen fünfzig Prozent seien der Fürsorge der Eltern zu verdanken.

Aber selbst das ist erheblich überschätzt. Zwei adoptierte, nicht blutsverwandte Kinder, die im selben Haushalt aufwachsen, ähneln sich keinen Deut mehr als zwei beliebig aus der Menge herausgegriffene Personen. Zur Ausfüllung der verbleibenden Erklärungslücke propagiert Pinker den lange übersehenen Einfluss der Altersgenossen, mit denen man aufwächst, und beugt damit dem Vorwurf vor, er würde genetischem Determinismus huldigen oder die Rolle der Umwelt aus den Augen verlieren. Spielkameraden sind schließlich Teil der Umwelteinflüsse auf eine sich formende Persönlichkeit.

Die Evolutionspsychologie betreibt die Suche nach genetisch vererbtem Verhalten nach dem Ausschlussprinzip. Wenn etwa das Verhalten, dass Männer jüngere Partnerinnen bevorzugen, eine genetische Grundlage haben soll, lässt sich zuerst überprüfen, ob es in allen Kulturen vorkommt. Das allein reicht natürlich nicht. »Nur weil jeder den Speer mit der Spitze voraus wirft, ist das noch kein angeborenes Verhalten«, wirft Pinker ein. »Aber es ist immerhin ein Anfang.« Dann fragen die Forscher, ob es eine Hypothese gibt, die in diesem Verhalten evolutionären Sinn erkennen lässt. Zum Beispiel den, dass ein Mann sich mit einer jüngeren Partnerin besser versteht (was unwahrscheinlich ist, weil ältere Partner erfahrener und emotional stabiler sind) oder mit ihr seinen Kinderwunsch besser zu erfüllen hofft. Dann lässt sich testen, ob Männer immer noch jüngere Frauen bevorzugen, wenn sie verhüten und keine Kinder wollen – und so weiter. »Man schließt eine Hypothese nach der anderen aus, bis eine übrig bleibt, die sich nicht widerlegen lässt«, fasst Pinker die Methode zusammen. Auf diese Weise gelingt es ihm zu zeigen, wie fruchtbar der evolutionäre Blickwinkel sein mag.

Oft genug verschwimmt die Unterscheidung zwischen ererbter Anlage und Umwelteinfluss – Grundlage des großen Streits – zu einem diffusen Grau, das herkömmliches Schwarz-Weiß-Denken nicht zulässt. So tragen etwa die sinnlichen Wahrnehmungen eines Babys dazu bei, wie sich das Gehirn verdrahtet. Doch allein der Umwelt lässt sich ein solcher Einfluss nicht zuschreiben, da er durch die Architektur des Sinnesapparates mit bestimmt wird. Die Welt besteht eben nicht nur aus zwei Lagern.

Die eigentliche Leistung des Buches besteht darin, die unterschwelligen Ängste auszuleuchten, die viele Menschen empfinden, die im Wochentakt mit wissenschaftlichen Neuigkeiten von der Entdeckung eines Verbrechergens, autonomen Robotern oder Klonversuchen konfrontiert werden. So schreibt Pinker von der Furcht, die genetische Sicht würde den Menschen den Lebenssinn nehmen: »Wenn sich zeigen lässt, dass all unsere Motive und Werte Produkte der Hirnphysiologie sind, die ihrerseits von den Kräften der Evolution geprägt wurden, dann wären sie in gewissem Sinn nur Schein und besäßen keine objektive Realität.«

Dieses Unbehagen entwirrt Pinker, indem er darauf verweist, dass eine moralische Empfindung, nur weil sie durch den Prozess von genetischer Selektion und Auswahl gewachsen ist, keineswegs schon ihrer Gültigkeit beraubt ist. Wir zweifeln schliesslich auch nicht an den Regeln der Arithmetik, nur weil der Mensch in Jahrmillionen einen kognitiven Apparat entwickelt hat, der ihm zu zählen erlaubt.

Ebenso entkräftet Pinker die Sorge, der Erforschung biologischer Grundlagen der menschlichen Natur würden zwangsläufig Werte wie Gleichberechtigung zum Opfer fallen: »Wer für politische Gleichheit eintritt, der erkennt an, dass die Menschen unveräußerliche Rechte besitzen, aber er braucht keineswegs zu meinen, sie wären in jeglicher Hinsicht ununterscheidbar.«

Der Streit um die Tabula rasa ist weitgehend erledigt. Aber eine gewisse Beklemmung bleibt – und Pinker bringt sie zur Sprache.

Hubertus Breuer

Der Rezensent ist promovierter Philosoph und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in New York.

Landkarten aus dem Internet

Ein Bild sagt mehr als tausend Worte – selbst gemachte Karten visualisieren raumbezogene Daten.

Von Gunther Jauk

Ein geografisches Informationssystem (GIS) verhält sich zu einer konventionellen Landkarte wie eine Datenbank zu einem Karteikästchen. Professionelle GIS – wie sie Behörden und Firmen häufig einsetzen – sind komplexe Programme, die räumliche Daten erfassen, verarbeiten und darstellen. Online-GIS dagegen beschränkt sich hauptsächlich auf die Darstellung. Im Internet kann damit jeder, auch ohne große Vorkenntnisse und spezielle Software, einfach Karten herstellen. Wer allerdings über keine einigermaßen schnelle Internetverbindung verfügt, sollte sich auf frustrierende Wartezeiten gefasst machen.

Die Cornell-Universität im US-Bundesstaat New York erfasst seit 1995 die gesamte Erdoberfläche digital. Unter **http://atlas.geo.cornell.edu** kann man von jedem beliebigen Flecken der Erde eine Karte erstellen; sogar Pisten durch die Sahara sind eingezeichnet. Es genügt, mit der Maus das entsprechende Gebiet auf der Weltkarte einzugrenzen. Als Reiseführer sind die Karten natürlich nicht geeignet, aber für einen schnellen Überblick reichen sie allemal. Mit Hilfe eines übersichtlichen und benutzerfreundlichen Menüs kann man auswählen, welche Signaturen – etwa Straßen oder Städte – man sich in der Karte anzeigen lassen will.

HTTP://GEODE.USGS.GOV U.S. GEOLOGICAL SURVEY

Die Nordamerikakarte des U.S. Geological Survey mit aktivierten Vulkan- (rote Dreiecke) und Hurrikansignaturen (schwarze Linien)

Der U.S. Geological Survey stellt auf **http://geode.usgs.gov** kostenlos Geodaten ausgewählter Weltgegenden zur Verfügung. Man hat die Auswahl zwischen 67 Großraumkarten, von Südamerika über Taiwan bis zum Balkan. Mit einem speziellen Tool kann man die Karte vergrößern oder verkleinern, kleinere Bereiche auswählen und je nach Interesse verschiedene Inhalte aktivieren. Die Informationen gehen sehr ins Detail. So zeigt die Karte von Südflorida auf Anforderung neben allgemeinen geografischen Signaturen wie Verkehrswegen oder Vegetation auch Gefängnisse, Spitäler und sogar die Schneisen der Zerstörung, die Hurrikans in den vergangenen Jahren geschlagen haben. Angehende San-Francisco-Touristen können sich in der entsprechenden Karte die Orte mit der schönsten Aussicht anzeigen lassen oder den Lebensraum des Weißkopfseeadlers.

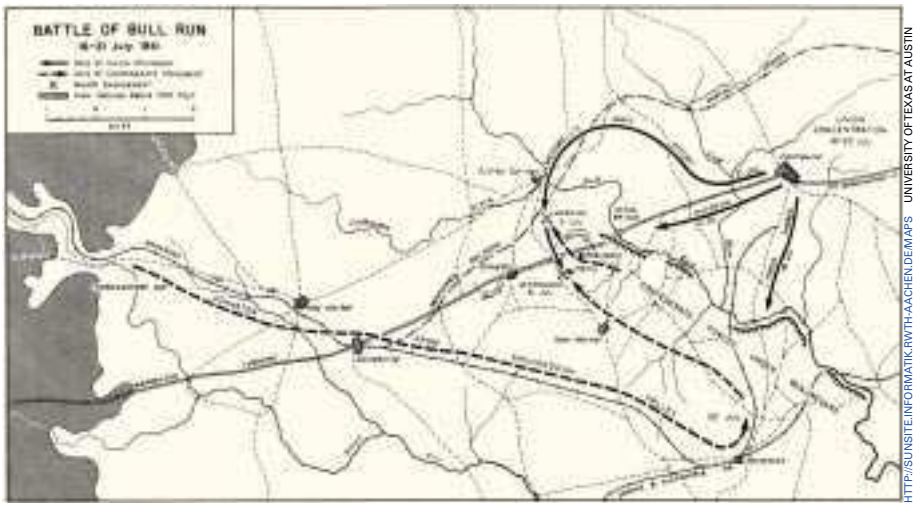
Vielfältiges aus dem polaren und subpolaren Bereich bietet das Umweltprogramm der Vereinten Nationen in Arendal (Norwegen) auf **http://maps.grida.no**. Wer wissen will, wie viel Niederschlag in Grönland oder in Alaska fällt, klickt sich in den interaktiven »Arctic Environmental Atlas«. Die Karte »Greenhouse Gases & Kyoto Protocol« ist ein in die Zukunft projiziertes Sündenregister: Je röter das Land dargestellt ist, desto stärker weicht es von seinen guten Emissionsvorsätzen ab. Obendrein enthält die Website noch eine Vielzahl an Karten mit verschiedensten Inhalten, die allerdings online nicht bearbeitet werden können.

Ebenso nur zum Anschauen sind die Karten, welche die Universität von Texas in Austin von allen Ländern der Welt von Afghanistan bis Zimbabwe zur Verfügung stellt (abrufbar über **http://SunSITE.Informatik.RWTH-Aachen.DE/Maps/**). Militärgeschichtlich Interessierte finden hier ein reichhaltiges Archiv an Karten zum amerikanischen Bürgerkrieg und anderen historischen Ereignissen (Bild unten).

Wer in die Welt der professionellen GIS-Anwendungen hineinschnuppern will, kann die Seite des Environmental Systems Research Institute (**http://www.esri.com**) abrufen. Die Firma ESRI in Redlands (Kalifornien) ist Weltmarktführer im Bereich Software für computergestützte GIS. Man findet hier Links zu weiteren Online-GIS-Anwendungen, so zum Online-Atlas von Kanada (**http://atlas.gc.ca**), der unter anderem über die Rauchgewohnheiten, die Geschichte oder das Durchschnittseinkommen der Kanadier Auskunft gibt. Sehenswert ist auch die Rubrik »Global Warming«, hier kann man Weltkarten mit Prognosen der Temperatur- und Niederschlagsveränderung bis ins Jahr 2100 herunterladen.

Deutschsprachige Seiten zum Thema sind leider Mangelware. Als kleine Entschädigung gibt es unter **www.gis-tutor.de** zumindest einen theoretischen Überblick zum Thema, mit speziellen Informationen zu GIS im Internet. ◁

Militärhistorische Karten vom Amerikanischen Unabhängigkeitskrieg bis zum Koreakrieg findet man auf der Seite der Universität von Texas, hier die Schlacht von Bull Run im Juli 1861 (Sezessionskrieg).



HTTP://SUNSITE.INFORMATIK.RWTH-AACHEN.DE/MAPS UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN

Der Autor ist freier Wissenschaftsjournalist in Graz.

KREISELPHYSIK

Wie funktioniert der Gyrotwister?

Ein neues Kreiselspielzeug kann durch geschickte Handbewegungen auf hohe Drehzahlen beschleunigt werden. Auf den ersten Blick scheint das physikalischen Gesetzen zu widersprechen.

Von Artur Hahn

Ein Paradox? Das neue Spielzeug wird in nur wenig verschiedenen Ausführungen unter den Handelsnamen »Powerball«, »Gyrotwister« oder »Rollerball« als Trimmgerät am Markt angeboten. Es besteht aus einem Gehäuse und einem darin beweglichen Kugelkreisel. Das Gehäuse, eine leichte Schale in Form einer dünnwandigen Hohlkugel, ist halbdurchsichtig und gestattet damit einen – wenn auch eingeschränkten – Blick auf den im Wesentlichen kugelförmigen schweren Kreiselkörper im Inneren.

Dieser hat eine Achse mit geringem Durchmesser, deren beide Enden in einer Nut auf der Innenseite des Gehäuses geführt sind. Die Nut verläuft auf einem Großkreis der Gehäusekugel. Sie ist ein wenig breiter als der Durchmesser der Achse, sodass sich Letztere in der Nut frei drehen oder auf ihren seitlichen Rändern abrollen kann. Der Kreisel selbst ist über ein kreisförmiges Loch im Gehäuse zugänglich, sodass man ihn mit einem flinken Daumen oder mit einer Schnur, die man ihm um den Bauch legt und dann ruckartig abzieht, auf Touren bringen kann.

Aber das ist nur der Anfang. Die Kunst besteht darin, den Kreisel auf noch weit höhere Drehzahlen zu beschleunigen, ohne ihn direkt zu berühren. Vielmehr geschieht der Antrieb allein dadurch, dass man das Gehäuse samt Inhalt geeignet in der Hand bewegt.

Wie kann das funktionieren? Alles, was Kreisel und Gehäuse miteinander verbindet, sind die beiden Punkte, in denen die Kreiselachse die Innenseite der Nut berührt. Kräfte, die man über diese Punkte übertragen kann, haben unvermeidlich die falsche Richtung; denn das von ihnen erzeugte Drehmoment steht senkrecht auf der Kreiselachse und kann daher allenfalls deren Richtung verändern, aber nicht die Rotation des Kreisels beschleunigen.

Zu diesem Ergebnis kamen wir jedenfalls unter Anwendung klassischer physikalischer Sätze an einem Spieleabend im Freundeskreis. Alle hatten zunächst vergeblich versucht, das Ding in Gang zu setzen, bis es schließlich doch gelang. Also hatten wir durch die Praxis die Theorie widerlegt. Wo steckt der Denkfehler?

Bewegungsformen des Kreisels: Wenn man das mit hoher Drehzahl surrende Spielgerät locker in der Hand hält, rotiert der Kreisel mit zeitlich unveränderter Achsenrichtung und nur langsam abnehmender Drehzahl. Die Wechselwirkung mit dem Gehäuse beschränkt sich auf eine geringe Reibung zwischen der Kreiselachse und einer (gleich bleibenden) Stelle der Führungsnut. Das ist die geläufige Bewegungsform des Kreisels: Die Drehachse lässt sich ohne weiteres parallel verschieben; aber ihre Orientierung im Raum zu verändern erfordert erheblichen Kraftaufwand – umso mehr, je schneller der Kreisel rotiert.

Zur Beschreibung der Rotation führt man eine vektorielle Größe namens Drehimpuls ein. Beim Kugelkreisel weist der Vektor in Richtung der momentanen Drehachse; was das Vorzeichen angeht: in die Richtung, in die eine handelsübliche (Rechts-)Schraube getrieben würde, wenn sie sich so drehte wie der Kreisel. Der Be-

GYROTWISTER VERTRIEB

Der Gyrotwister wird als Trainingsgerät zur Stärkung der Handmuskulatur angepriesen: für Sportler, Pianisten und Tastaturbenutzer aller Art.

trag des Drehimpulses ist in Spezialfällen, zu denen auch der Kugelkreisel gehört, gleich dem Produkt aus der Winkelgeschwindigkeit und dem so genannten Trägheitsmoment bezüglich der Drehachse; das Trägheitsmoment schließlich ist umso größer, je mehr Masse rotiert und je weiter sie von der Drehachse entfernt ist.

Allgemein gelten für den Drehimpuls analoge Sätze wie für den gewöhnlichen Impuls, der als Masse mal Geschwindigkeit definiert ist. Der Impuls eines bewegten Körpers bleibt erhalten, solange keine Kraft auf ihn einwirkt; entsprechend ändert sich der Drehimpuls eines rotierenden Körpers nur dadurch, dass ein Drehmoment auf ihn einwirkt. Die Änderung (zeitliche Ableitung) des Drehimpulses ist gleich dem Drehmoment: $d\vec{I}/dt = \vec{M}$ oder $d\vec{I} = \vec{M}\,dt$.

Für Letzteres gibt es die Kurzdefinition »Kraftarm mal Kraft« ($\vec{M} = \vec{L} \times \vec{F}$). Allerdings bedeutet »mal« das Kreuzprodukt von Vektoren, das heißt: Der Vektor $\vec{M}$ steht senkrecht auf den Vektoren $\vec{L}$ und $\vec{F}$, und sein Betrag (seine »Länge«) ist nur dann das Produkt der Beträge von $\vec{L}$ und $\vec{F}$, wenn diese senkrecht aufeinander stehen; im Allgemeinen ist er kleiner.

Auf unseren ruhig vor sich hin rotierenden Kreisel wirken (fast) keine Drehmomente, weswegen der Drehimpuls nach Richtung und Betrag (annähernd) konstant bleibt. Und selbst wenn ein Drehmoment wirkt, dessen Vektor aber senkrecht auf dem Drehimpulsvektor steht, ändert sich nur dessen Richtung, nicht aber sein Betrag (Bild rechts unten).

Die antriebsfreie Präzession: Interessanter als die soeben beschriebene freie Rotation ist die Präzessionsbewegung. Halten wir zunächst das Gehäuse kräftig fest, sodass es sich überhaupt nicht mehr bewegt (was uns bei den starken auftretenden Kräften nur näherungsweise gelingen wird). Die Führungsnut im Gehäuse liegt dann unbeweglich im Raum fest. Dabei wandert (»präzediert«) die Kreiselachse langsam in dem Kreis, der ihr durch die Nut vorgegeben ist. Im Gegensatz zur freien Rotation reibt sie sich nicht an der Innenseite der Nut, sondern rollt ohne Schlupf an ihr ab (Bild rechts oben), auf der einen Seite am »oberen« Nutrand, auf der anderen Seite am »unteren« (wobei die im Bild oben und unten eingezeichneten Nutränder beliebig im Raum liegen können).

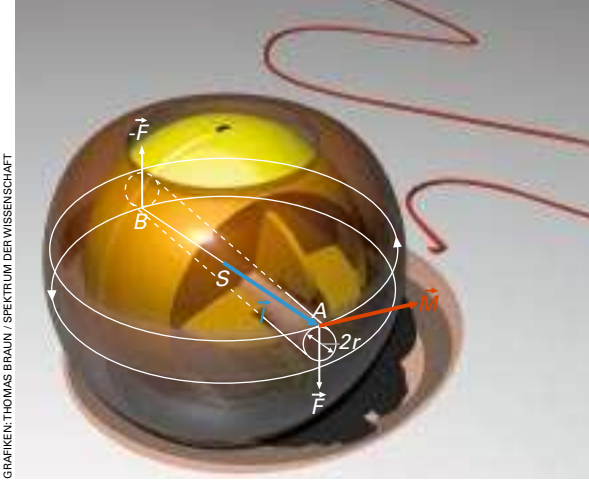
Der Durchmesser des Gehäuses und damit auch des Nutrandes ist ungefähr fünfzigmal so groß wie der Durchmesser der Kreiselachse, dort wo sie auf dem Nutrand entlangläuft. Bei genauerem Hinsehen zeigt sich nämlich, dass die Achse sich an den äußersten Enden bis auf eine Dicke von etwa einem Millimeter verjüngt, während das gesamte Spielzeug ungefähr fünf Zentimeter Durchmesser hat. Wenn also der Kreisel fünfzig Umdrehungen vollführt hat, ist er genau einmal auf dem (inneren) Umfang des Gehäuses abgerollt: Präzessions- und Rotationsfrequenz verhalten sich wie die Radien von Kreiselachse und Gehäuse, in diesem Fall also wie 1 zu 50.

Kräfte können nur von den Nuträndern auf die beiden Kreiselachsenenden ausgeübt werden. Das Drehmoment dieser Kräfte ist senkrecht zur Kreiselachse gerichtet. Von der (materiellen) Kreiselachse zu unterscheiden ist die (unendlich dünne) momentane Drehachse, das heißt die gerade Linie, deren Punkte zum jeweiligen Zeitpunkt die Geschwindigkeit null haben. Sie ist gleich der Geraden durch die beiden Berührpunkte A und B und ändert sich im Allgemeinen mit der Zeit. Aber auch auf ihr und damit auf dem Drehimpulsvektor steht das durch die Nutränder erzeugte Drehmoment senkrecht; deswegen kann der Drehimpuls durch dieses Drehmoment nur in seiner Richtung geändert werden (was geschieht, denn der Kreisel präzediert ja), nicht aber in seinem Betrag. Insbesondere kann die Drehzahl, die ja dem Betrag des Drehimpulses proportional ist, nicht anwachsen.

Nach einer kurzen Zeit dt ist der Berührungspunkt A um ein kleines Stück auf dem oberen Kreis im Bild rechts oben vorgerückt, desgleichen der Berührungspunkt B auf dem unteren Kreis. Im Resultat durchläuft die momentane Rotationsachse, und damit auch der Drehimpulsvektor, einen – sehr flachen – Kegel mit der Kegelspitze im Schwerpunkt S.

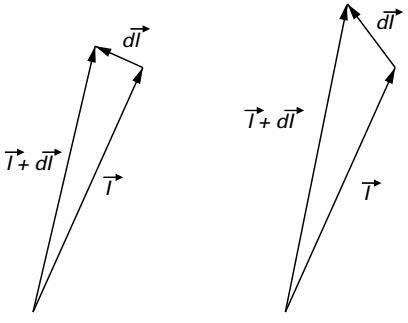
In der Praxis kann man das Spielzeug kaum ganz starr festhalten. Wenn der Spieler den Reaktionskräften des Kreisels nur etwas federnd folgt, ohne ihn willentlich anzutreiben, wirkt seine Hand wie ein System von Schraubenfedern, in dem das Spielzeug aufgehängt ist. Kreisel und Federn können zwar Energie austauschen, etwa indem durch Kreiselkräfte eine Feder gespannt wird, die beim Entspannen die an sie übertragene Energie an den Kreisel zurückgibt. Aber dadurch kann die Gesamtenergie des Systems und damit die Drehzahl des Kreisels nicht zunehmen. Bei dieser Bewegung ist das Drehmoment stets senkrecht zum Drehimpuls gerichtet (siehe Kasten nächste Seite).

Antrieb: Will man dagegen den Kreisel auf höhere Touren bringen, muss man ihm Energie zuführen, das heißt Arbeit leisten. Arbeit ist »Kraft mal Weg«, genauer Kraft mal der Komponente des Weges in Richtung der Kraft. Wir können aber eine Kraft nur über den Berührpunkt von Kreiselachse und Nutrand ausüben, und das war bisher stets ein Punkt der momentanen Drehachse, das heißt ein Punkt, der sich – in diesem Moment – überhaupt nicht bewegt. Wo kein Weg ist, da hilft keine Kraft. Wir müssen also diese Identität von ▷



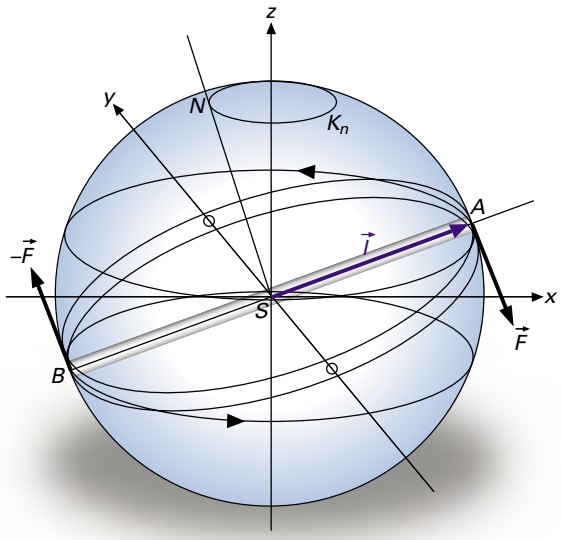
GRAFIKEN: THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Indem die Ränder der Führungsnut die Kreiselachse »in die Spur« zwingen, üben sie ein in den Punkten A und B angreifendes Kräftepaar ($\vec{F}$, $-\vec{F}$) aus. Das dadurch erzeugte Drehmoment steht senkrecht auf $\vec{F}$ und auf dem von S nach A führenden Vektor $\vec{L}$ des Hebelarms. Da die momentane Drehachse und damit der Drehimpulsvektor in dieselbe Richtung weisen wie $\vec{L}$, stehen Drehimpuls und Drehmoment senkrecht zueinander.



Wenn die Änderung $d\vec{I}$ des Drehimpulses $\vec{I}$ senkrecht auf $\vec{I}$ selbst steht, ändert sich nur dessen Richtung (links). Sein Betrag wird erst dann größer, wenn $d\vec{I}$ eine Komponente in Richtung von $\vec{I}$ hat (rechts).

Drehmoment, Drehimpuls und Präzession



Die eigenwillige Bewegung des Kreisels

Auf der Innenseite des annähernd kugelförmigen Kreiselgehäuses verläuft die Nut entlang des Äquators, dargestellt durch die beiden eng benachbarten Kreise. Auf der Nutebene ist im Kugelmittelpunkt die Senkrechte errichtet; sie durchstößt die Kugeloberfläche im »Nordpol« *N*. Bei der antriebsfreien Präzessionsbewegung folgt das Gehäuse samt Nut der Präzessionsbewegung des Kreisels derart, dass der Punkt *N* einen Kleinkreis K_n um die raumfeste Präzessionsachse durchläuft – in Pfeilrichtung und mit der Präzessionsfrequenz des Kreisels.

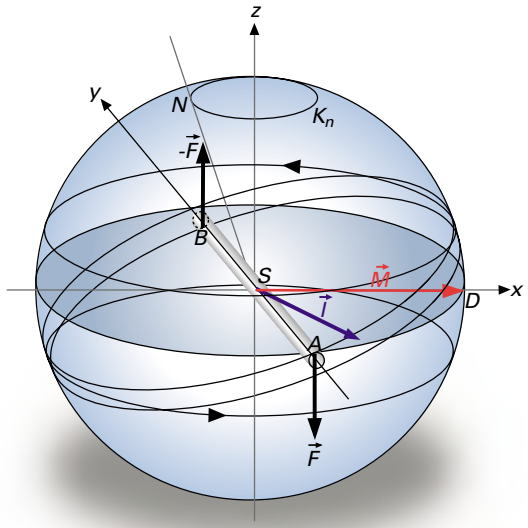
Wir legen in diese Anordnung ein rechtwinkliges Koordinatensystem so, dass die *z*-Achse gleich der Präzessionsachse ist und die Verbindungslinie der Abrollpunkte *A* und *B* und damit auch der Drehimpulsvektor $\vec{l}$ sowie die Kraftvektoren $\vec{F}$ und $-\vec{F}$ in der *x*-*z*-Ebene liegen. Während der Präzessionsbewegung dreht sich das gesamte Bild um die *z*-Achse und bleibt im Übrigen unverändert. Insbesondere bleibt die relative Lage der Vektoren $\vec{l}$, $\vec{F}$, $\vec{M}$ und der »Erdachse« *SN* erhalten. Der Punkt *A* (ebenso der Punkt *B*) ist kein fester Punkt des Nutrandes; vielmehr nehmen im Verlauf einer Drehung alle seine Punkte nacheinander die Rolle des Punktes *A* ein. Der Punkt aber, der gerade Punkt *A* ist, ruht in diesem Moment, weil er sich im oberen Umkehrpunkt der Bewegung befindet.

Das Drehmoment liegt dann in *y*-Richtung, das heißt senkrecht zur *x*-*z*-Ebene nach hinten gerichtet. Es steht insbesondere senkrecht auf der Richtung des Drehimpulses, der sich daher betragsmäßig nicht ändern kann.

Wenn dagegen bei unveränderter Gehäusestellung die Kreiselachse nicht in der *x*-*z*-Ebene, sondern in Richtung der *y*-Achse verläuft (Bild unten), erteilt dieselbe Präzessionsbewegung des Gehäuses (die sich jetzt nicht von selbst ergibt, sondern ihm von der Hand des Spielers aufgezwungen wird) dem Kreisel über das Kräftepaar $\vec{F}$, $-\vec{F}$ ein Drehmoment, das nicht genau senkrecht auf dem Drehimpulsvektor steht. Vielmehr liegt das Drehmoment in *x*-Richtung, der von *S* aus abgetragene Drehimpulsvektor $\vec{l}$ dagegen nicht in Richtung der Geraden *SA*, sondern gerade so, dass infolge der Rotation um die momentane Drehachse, also die Richtung von $\vec{l}$, der Punkt *A* die richtige Abwärtsgeschwindigkeit hat. $\vec{l}$ hat also jetzt eine nicht-verschwindende Komponente in Richtung von $\vec{M}$! Zur Verdeutlichung ist die Abweichung des Drehimpulsvektors $\vec{l}$ von der materiellen Kreiselachse stark übertrieben dargestellt.

Worin bestand also der eingangs erwähnte Denkfehler? In einer Verwechslung der materiellen Kreiselachse mit der momentanen Drehachse.

Quantitatives: Der Kreisel eines Gyrotwisters hat eine Masse von etwa 250 Gramm. Daraus ergibt sich (bei homogener Massenverteilung) ein Trägheitsmoment von 0,625 kg cm^2. Das Drehmoment, welches das Spielzeug auf die festhaltende Hand ausübt, ist dem Quadrat der Drehzahl proportional und beträgt bei 200 Umdrehungen pro Sekunde (laut Bedienungsanleitung sind 230 erreichbar) immerhin 2 kg m^2/s^2. Damit übt das Gerät bei einem Kraftarm von 2,5 cm eine Kraft von 80 N auf die Hand des Spielers aus – das Dreißigfache seines Eigengewichts!



GRAFIKEN: THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: ARTUR HAHN

▷ Berührpunkt und Drehachsenpunkt aufbrechen.

Das läuft darauf hinaus, dass wir den Berührpunkten eine von null verschiedene Geschwindigkeit erteilen müssen. Am effektivsten geht das, indem man dem Gehäuse die gleiche Präzessionsbewegung aufzwingt, wie sie sich bei der antriebsfreien Präzession ergeben würde, jedoch mit einer um 90 Grad vorauseilenden Phase. Dann bewegt sich nämlich bei der Weiterbewegung des Gehäuses der Kontaktpunkt *A* nach unten, das heißt in Richtung der wirkenden Kraft: Die auf den Kreisel übertragene Leistung ist von null verschieden (unteres Bild im Kasten). Die kinetische Energie des Kreisels, und damit seine Drehzahl, muss also zunehmen.

Das Spielzeug ist qualitativ verstanden, das Spiel ist aus! ◁

Artur Hahn ist Professor am Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik der Ruhr-Universität Bochum. Der so genannte Ruhestand gibt ihm Gelegenheit, sich mit Spielereien wie der vorliegenden zu beschäftigen.

Literaturhinweis

Vorlesungen über Theoretische Physik. Bd. 1: Mechanik. Von Arnold Sommerfeld. Harri Deutsch, Frankfurt am Main 1994.

1953

Erstmaliger Ersatz der Harnblase

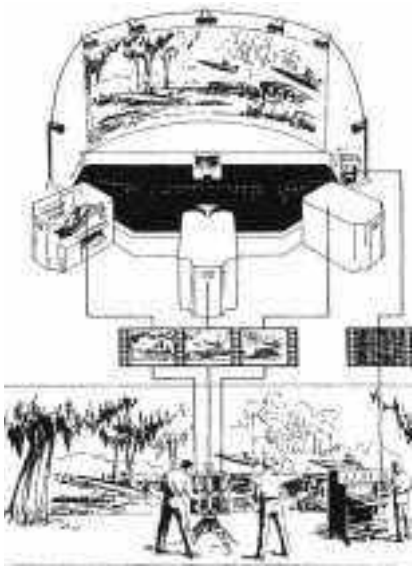
In Tübingen berichtete W. Staehler über die erstmals gelungene Operation, mit der beim Menschen eine künstliche Harnblase mit einem völlig physiologischen Entleerungsmechanismus geschaffen wurde, nachdem zuvor zahlreiche entsprechende Versuche an Hunden erfolgreich verliefen. … Nach vorheriger Umpflanzung der Harnleiter in den Darm wurde aus dem Dünndarm ein etwa 30 Zentimeter langes Darmstück ausgeschaltet und mit dem Stumpf der Harnröhre an Stelle der bisherigen Blase verbunden. In einer gesonderten Operation wurden dann die in den Darm umgepflanzten Harnleiter in die neue Harnblase zurückversetzt. Die neuen Blasen können etwa 300 bis 400 Kubikzentimeter Urin aufnehmen und lassen sich gut und auf vollständig normale Weise entleeren. *(Die Umschau, 53. Jg., Heft 3, 1953, S. 122)*

Verlagerung des geographischen Nordpols

Das amerikanische Carnegie-Institut hat ermittelt, daß sich nicht nur der magnetische, sondern auch der geographische Nordpol in Bewegung befindet. Der betreffenden Mitteilung zufolge soll sich in den letzten 30 Jahren eine Verlagerung von rund 4 Metern ergeben haben. Die Veränderung wird mit der Verschiebung der Erdkruste in Verbindung gebracht. *(Westermanns Monatshefte, 94. Jg., Heft 2, 1953, S. 97)*

Dreidimensionales Kino

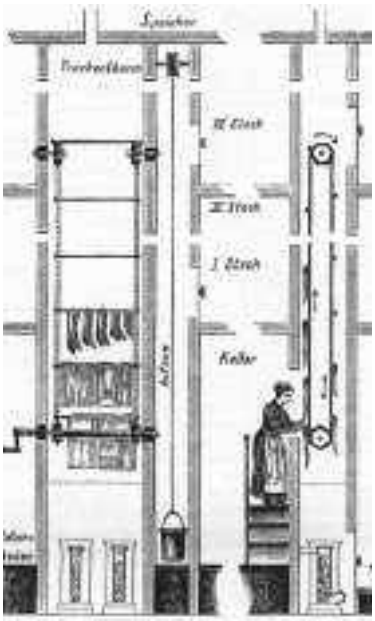
Cinerama, eine »noch nicht dagewesene« Art von Kino, feiert jetzt in New York seine Welt-Uraufführung. … Es ist bemüht, die Sehweise des menschlichen Auges nachzuschaffen. … Waller konstruierte eine Kamera mit drei Objektiven, die in einem Winkel von etwa 40° zueinanderstehen … und der menschlichen Sehweise sehr nahekommen. Die drei Bilder, die diese Objektive aufnehmen, werden mit drei Projektionsapparaten in perfekter Synchronisierung auf eine konkav gewölbte Leinwand geworfen: der rechte Projektor wirft das Bild auf die linke Seite der Leinwand, der linke auf die rechte, und das mittlere Bild wird geradeaus projiziert. … Aus dieser Riesenleinwand, die den Gesichtskreis des Beschauers füllt, scheint das panorama-artige Bild dreidimensional herauszuspringen. *(Photomagazin, 1953, S. 18)*



Das Cinerama mit drei Projektoren für einen dreidimensionalen Eindruck

Trockenthürme für neue Wohnhäuser

Das Trocknen der Wäsche auf den unter dem Dach vorgesehenen Trockenböden ist mit grossen Zeitverlusten verknüpft, deshalb empfiehlt sich eine einfache und doch praktische Vorrichtung. … Das Prinzip des Meidinger'schen Trockenthurms besteht in Folgendem: Die Wäsche wird in einem engen hohen Schacht übereinander aufgehängt; so kann die unten erzeugte warme Luft von selbst in die Höhe steigen und oben abgekühlt, sowie mit Feuchtigkeit geschwängert in die freie Luft entweichen. … Mittels einer Kurbel wird die Trocknungsvorrichtung nach Behängung einer Stange bis zur nächsten gedreht. Unten im Schacht sind zwei Füllöfen aufgestellt, welche die zur Trocknung der Wäsche erforderliche heisse Luft liefern. *(Hannoversches Gewerbeblatt, Heft 3, 1903, S. 21–22)*



Wäschetrockenthurm für Wohnhaus

Künstliches Nordlicht in London

1903

Ein kräftiger Elektromagnet war in vertikaler Stellung angebracht. Zwischen seinen oberen und seinen unteren Polstücken war eine luftleer gemachte Glasglocke eingesetzt, die im oberen Teile einen kreisförmigen Ring enthielt. Ein kräftiger Wechselstrom … rief dort eine ringförmige Glimmentladung hervor. Wenn man dann durch die Spulen des Elektromagneten einen Strom schickte, so wurde die ringförmige Entladung nach unten in der Form von Strömungen abgelenkt, die den beim Nordlicht beobachteten durchaus glichen. Bekanntlich haben die Untersuchungen des Nordlichtspektrums das Vorhandensein von Krypton erwiesen. Dies illustrierte dessen Mitentdecker Ramsay nun, indem er die Glocke mit verdünnter Luft füllte, wobei man sogleich bei der Entladung die Anwesenheit von Krypton beobachtete. *(Naturwissenschaftliche Wochenschrift, Bd. XVIII, Nr. 20, 1903, S. 237)*

Nebelmassen um Nova

In der Umgebung der Nova Persei sind von G. W. Kitchen mit dem 24zölligen Reflektor der Yerkes-Sternwarte Nebelmassen photographiert worden, die sich nach allen Seiten hin ausbreiten. Die Nebel umgeben die Nova in einem weiten elliptischen Bogen und enthalten Stellen von wechselnder Lichtstärke. *(Der Stein der Weisen, Bd. 29, 1903, S. 141)*

Verschlüsselter Zugang

Von Pierre Tougne

Um sich einen Türsteher zu sparen, der alberne mathematische Rätsel stellt, hat die Vereinigung der mathematischen Logiker einen raffinierten Schließapparat für ihr Vereinsheim entwickelt.

Das Türschloss wird durch vier einfache Schalter gesteuert, die im Quadrat angeordnet sind. Die Türe öffnet sich dann, wenn alle Schalter geöffnet oder alle geschlossen sind. Will das nächste Vereinsmitglied eintreten, so ist die Tür stets verriegelt. Das heißt, es kommen sowohl geöffnete als auch geschlossene Schalter vor.

Der Einlass Begehrende kann aber weder die Schalter sehen noch sie direkt bedienen. Vielmehr sind an der Tür nur vier Tasten mit den Bezeichnungen *B, D,* 1 und 2 angebracht.

Drückt man auf *B*, so werden zwei waagrecht oder senkrecht benachbarte Schalter zufällig ausgewählt, drückt man hingegen auf *D*, werden zwei diagonal einander gegenüberliegende Schalter zufällig ausgewählt. Nachdem die Auswahl getroffen ist, legt ein Druck auf die Taste 1 einen beliebigen der beiden ausgewählten Schalter um, während durch Taste 2 beide Schalter betätigt werden. Die Abfolge »Buchstabentaste, Zifferntaste« darf man so oft wiederholen, bis sich die Türe öffnet (oder der Eindringling die Geduld verliert).

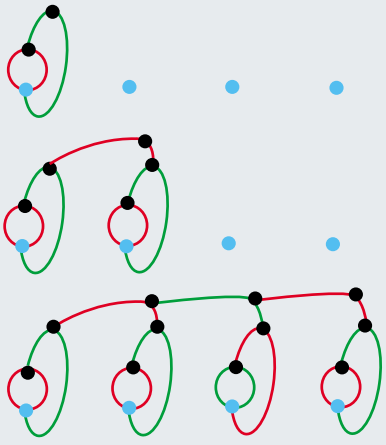
Finden Sie den kürzesten vollständigen Code, der die Türe mit Sicherheit öffnet, ganz gleich, wie die vier Schalter am Anfang stehen.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D–69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir einmal das Medienpaket »Brockhaus Naturwissenschaft und Technik«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11. Februar 2003, eingehen.

Das neu erschienene Medienpaket »Brockhaus Naturwissenschaft und Technik« (Brockhaus, Mannheim, und Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg) enthält rund 20000 Artikel mit 45000 Stichwörtern zu Naturwissenschaft und Technik. Auf circa 2300 Seiten in drei Bänden finden sich rund 3000 Abbildungen und 350 Tabellen sowie 75 ausführlichere Essays zu besonderen Themen. Dazu eine CD-Rom mit Volltextrecherchemöglichkeit.

Lösung zu »Sprouts« (Dezember 2002)

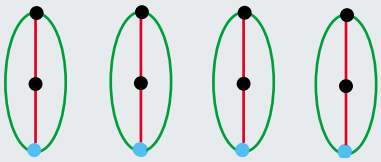


Bei einer Partie Sprouts entstehen mindestens $2n$ und höchstens $3n-1$ neue Knoten.

Claus Busse aus Leggiuno (Italien) erkannte, dass n Anfangsknoten insgesamt $3n$ freie Anschlussstellen haben. Jeder Zug von »Sprouts« verbraucht zwei Anschlussstellen und schafft nur eine neue, vermindert also deren Gesamtzahl um 1. Spätestens nach $3n-1$ Zügen und ebenso vielen neu entstandenen Knoten ist das Spiel zu Ende, denn bei nur einer freien Anschlussstelle ist kein Zug mehr möglich.

Die Abbildung links zeigt den Verlauf einer Partie für beliebig viele Knoten, bei der diese Maximalzahl tatsächlich ausgenutzt wird. Die Anfangsknoten sind blau.

Will man die Zahl der neuen Knoten minimieren, muss man möglichst oft die einzige noch freie Anschlussstelle eines Knotens unerreichbar machen, das heißt, diesen Knoten vollständig durch Kanten einschließen, deren Knoten ihrerseits keine freie Anschlussstelle mehr haben. Um einen Knoten in diesem Sinne zu isolieren, braucht man mindestens zwei neue Knoten, die ihn mit Kanten umschließen. Um bei n Anfangsknoten alle Knoten entweder abzusättigen oder zu isolieren, sind also mindestens $2n$ neue Knoten erforderlich, etwa so wie hier abgebildet.



Die Gewinner der fünf Schlüsselringe »Spin Code« sind Claus Busse, Leggiuno (Italien); Katharina Doblhoff, Wien; Gerhard Guthöhrlein, Marburg; Heinz Wechsler, Asperg; und Angela Vormbrock, Bielefeld.

In der Lösung zu »Zehn mal sechs« (Rätsel vom Oktober 2002, Lösung im Dezember 2002) haben wir in der letzten Gleichung versehentlich ein Divisionszeichen weggelassen. Die richtige Lösung mit den drei Neunen lautet:

$9 - 9 : \sqrt{9} = 6$.

Wir bitten den Fehler zu entschuldigen.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Die stärksten Explosionen im Weltall

Lange rätselten Astronomen vergebens. Doch allmählich lüften sie das Geheimnis, woher die energiereichsten Explosionen im All, die so genannten Gammastrahlen-Ausbrüche, stammen.

WEITERE THEMEN IM MÄRZ

Chaos in der Quantenwelt

Chaotische Systeme reagieren empfindlich auf minimale Änderungen der Anfangsbedingungen. Sind sie zudem winzig klein, zeigen sie Quanteneffekte – für Nanotechniker eine interessante Perspektive.

Report: Musik digital

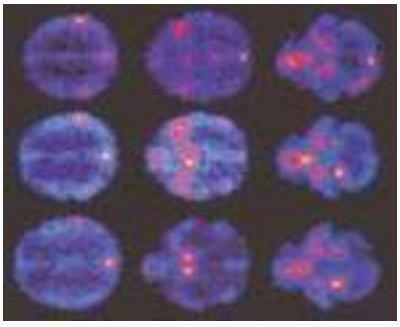
Wenn Schellack-Star Caruso ohne Knistern und Knacksen von der CD erklingt, verdankt der Hörer das findigen Tontechnikern und Computern. Kein Einzelfall: Die gesamte Musikbranche arbeitet längst mit ausgefeilter Digitaltechnik.

Schmutzige Bomben

Radioaktivität als Mittel des Terrors: Wie kann man sich gegen radiologische Waffen schützen, die ihre Opfer verstrahlen und die Bevölkerung verunsichern?

Der Streit um den Ursprung der Menschheit

Über die Herkunft des modernen Menschen und die Einordnung des Neandertalers tobt seit zwanzig Jahren eine heftige Debatte. Der Anthropologe Günter Bräuer rückt die Faktenlage zurecht und räumt einige Missverständnisse aus.



Gehirnforschung vor der Schwelle zum Denken

Die gewaltigen Fortschritte der Neurowissenschaften ermöglichen den Vorstoß in neue Dimensionen. Bald schon dürften Hirnforscher soziale Beziehungen, Denken und Sprache ergründen.